



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Muret byggeri og indeklima

Teglvægges fugtoptag og afgivelse ved pludselig ændringer af den indvendige fugtbelastning

Gunnarsen, Lars; Logadóttir, Ásta; Afshari, Alireza; Rode, Carsten; Glendorf, Rikke Møller

Publication date:
2009

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Gunnarsen, L., Logadóttir, Á., Afshari, A., Rode, C., & Glendorf, R. M. (2009). *Muret byggeri og indeklima: Teglvægges fugtoptag og afgivelse ved pludselig ændringer af den indvendige fugtbelastning*. SBI forlag. SBI Nr. 2009:01

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Muret byggeri og indeklima

Teglvægges fugtoptag og afgivelse ved pludselig ændringer af den indvendige fugtbelastning



Muret byggeri og indeklima

Tegl vægges fugtoptag og afgivelse ved pludselig ændringer af den indvendige fugtbelastning

Lars Gunnarsen
Ásta Logadóttir
Alireza Afshari
Carsten Rode
Rikke Møller Glendorf

Titel	Muret byggeri og indeklime
Undertitel	Teglvægges fugtoptag og afgivelse ved pludselig ændringer af den indvendige fugtbelastning
Serietitel	SBi 2009:01
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2009
Forfattere	Lars Gunnarsen, Ásta Logadóttir, Alireza Afshari, Carsten Rode, Rikke Møller Glendorf
Sprog	Dansk
Sidetal	89
Litteratur-henvisninger	Side 31
Emneord	Indeluft, vægkonstruktioner, indeklime, vægmaterialer, muret byggeri, træhus, gipsplader, fuldmuret hus, overfladebehandling, fugt.
ISBN	978-87-563-1355-1
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut, Dr. Neergaards Vej 15, DK-2970 Hørsholm E-post sbi@sbi.dk www.sbi.dk

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen: *SBi 2009:01: Muret byggeri og indeklime. Teglvægges fugtoptag og afgivelse ved pludselig ændringer af den indvendige fugtbelastning. (2009)*



Indhold

Forord	4
Abstrakt	5
Indledning	6
Metode	7
Feltforsøg	7
Modelberegninger	9
Simuleringer i BSim	10
Resultater	12
Feltforsøg og modelberegninger	12
Simuleringer i BSim	16
Simuleringer i forbindelse med målingerne i foråret 2006	17
Årssimuleringer af temperaturforhold	19
Årssimuleringer af fugtforhold	22
Simuleringer uden overfladebehandling	25
Diskussion af resultater	27
Feltforsøg	27
Simuleringer i BSim	28
Konklusion	30
Referencer	31
Bilagsoversigt	32



Forord

Nærværende projekt har til formål at vurdere forskellige vægkonstruktioners evne til at udjævne indeluftens fugtighed i forbindelse med pludselige ændringer af de indre fugtkilders styrke. Projektet tager udgangspunkt i et pilotprojekt rapporteret i SBi-notatet "Muret byggeri og indeklime – Resultater fra et pilotprojekt", 14.04.2004. Projektet indgår i et bredere tema om muret byggeri og indeklime, hvor teglvægges betydning for indeklimeforholdene sammenstilles og analyseres.

Pilotprojektet påviste, at under stationære forhold har vægmateriale kun ringe betydning for indholdet af fugt og øvrige forureninger i indeluften. Kildestyrken og ventilationen er langt mere afgørende. Pilotprojektet påviste dog usikkerhed om materialernes betydning for udjævning af pludselige fugtbelastninger i forbindelse med f.eks. badning, madlavning og strygning. Dette er baggrunden for nærværende publikation.

Dataindsamlingen har omfattet feltforsøg i tre eksisterende boliger, henholdsvis et fuldmuret hus med indfarvet kalkpuds som indvendig overfladebehandling, et træhus med akrylmaledede gipsplader samt et muret hus med akrylmalet letbeton. Indsamlede data er sammenlignet med en simpel model for fugt i indeluft. Parallelt hermed er der udført simuleringer i BSim med henblik på at gengive fugtoptag under og efter målingerne, simuleringer af referencesituationer for måleperioderne samt helårssimuleringer. Beregningerne har indbefattet bygningernes termiske indeklime.

Nærværende delprojekt er gennemført i et samarbejde mellem Lektor Carsten Rode, DTU Byg, der har foretaget simuleringer i BSim og af rapporteret disse; PhD-studerende Ásta Logadóttir, Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), der har foretaget beregninger af størrelsen af de forskellige transportveje for den tilførte fugt; Seniorforsker Alireza Afshari, SBI, der har bidraget til dataindsamlingen; Videnskabelig assistent Rikke Møller Glendorf, SBI, der har bidraget væsentligt til af rapporteringen samt Seniorforsker Lars Gunnarsen, SBI, der har været projektleder. Seniorforsker Eva B. Møller, SBI har kvalitetssikret rapporten.

Projektet er gennemført med støtte fra Kalk- og Teglværksforeningen af 1893.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet
Byggeri og Sundhed
Januar 2009

Niels Jørgen Aagaard
Forskningschef



Abstrakt

Projektet har inkluderet tre elementer:

- 1 Feltforsøg med målinger af henfald af relativ fugtighed i tre huse. Målingerne foregik i tre hustyper; henholdsvis et fuldmuret hus med indfarvet kalkpuds indvendigt og udvendigt, et træhus med akrylmaledede gipsplader indvendigt samt et muret hus med akrylmalet letbeton indvendigt. Målingerne startede henholdsvis 8. marts, 16. marts og 22. maj 2006. I huse-
ne blev der afdampet mellem 0,7 og 1,5 kg vand i løbet af 15 minutter. Under afdampningen og 40 timer frem blev målt vanddampkoncentration og temperatur udendørs og i målerummet.
- 2 Målingerne blev sammenlignet med en matematisk model for vandindholdet i indeluften. Modellen indeholdt ikke absorption og diffusion, og væsentlige forskelle mellem model og målinger skyldes derfor disse forhold.
- 3 Der er samtidig foretaget simuleringer i BSim af de hygrotermiske forhold i de tre bygninger. Yderligere er der for at øge mulighederne for at sammenligne resultater foretaget helårssimuleringer for geometri og beliggenhed af det fuldmurede hus med de forskellige væg- og gulvkonstruktionerne fra de tre bygninger; henholdsvis med og uden indendørs overfladebehandling.

Modelberegninger på de gennem feltforsøget opnåede måledata viser estimerede fugtoptag pr. vægareal for de tre huse. Det fuldmurede hus har efter 4 timer har det største estimerede fugtoptag pr. m^2 vægareal, efterfulgt af først det murede hus og derefter træhuset. 8 timer efter afdampningens start har det murede hus det største fugtoptag pr. m^2 vægareal, efterfulgt af henholdsvis det fuldmurede hus og træhuset. Ses der på det samlede fugtoptag pr. vægareal, placerer det murede hus sig igen over de øvrige huse, hvilket dog sker langsommere og over en noget længere periode (24 timer). Det kan på baggrund heraf konkluderes, at det fuldmurede hus i nærværende forsøg er bedre til at udjævne kortvarige fugtbelastninger af indeluften efter 4 timer, mens det murede hus har en større fugtbufferkapacitet efter 8 timer. Det bør her understreges, at luftskiftet har langt større betydning for de indendørs fugtforhold end materialevalget set over en længere periode.

Simuleringer i BSim af de hygrotermiske forhold i de tre huse samt helårssimuleringer af referencekonstruktioner har yderligere vist, at det fuldmurede hus har et mere stabilt termisk indeklima i varme perioder her efterfulgt af det murede hus med træhuset som det mindst stabile.



Indledning

I Danmark tilbringes 80-90 % af tiden inden døre. Påvirkningerne i indeklimaet kan derfor være af stor betydning for befolkningens sundhed og velvære. Her kan fugt- og vandskader, med mulighed for efterfølgende skimmel- og svampevækst og forhøjet antal af husstøvmider, give anledning til sygdom eller gener i boligen, særligt for de mere følsomme personer, der eksempelvis lider af allergi eller astma. Ved at reducere fugtproblemer i boligen er det muligt, at mindske de fugtrelaterede kilder til allergener i indeklimaet som husstøvmider og vækst af skimmelsvampe.

Bortskaffelsen af fugt sker hovedsageligt via udeluftskiftet. En mindre fugtmængde deponeres desuden på indre overflader og en del heraf diffunderer ud gennem klimaskærmen. Deponeringen sker, når indeluftens fugtindhold er stigende, mens der tilsvarende sker en reemission, når fugtindholdet er faldende. Klimaskærmens konstruktion og beskaffenhed kan derfor have betydning for fugtindholdet i indeluften. Murede vægge har attraktive adsorptions- og diffusionsegenskaber samt en høj vægt, der muliggør en vis deponering af fugt i væggene. Som vist i notatet "Muret byggeri og indeklima - Resultater fra et pilotprojekt", har det dog begrænset betydning under stationære forhold inden døre, da ventilation her er påvist som den mest signifikante faktor.

Ifølge Indeklimahåndbogen har murværk af tegl gode indeklimatiske egenskaber, herunder evnen til at optage og afgive fugt, under forudsætning af, at fugtbelastningen ikke er vedvarende. Baggrunden for indeværende projekt er primært et ønske om at kunne belyse traditionelle tegl/kalkpuds-konstruktioners betydning for indendørs fugtforhold i boligen sammenholdt med nyere bygninger af træ/gips- og tegl/letbeton-konstruktioner.

Dette delprojekt har derfor til formål at undersøge, hvorvidt der under de ikke-stationære forhold, der ofte forekommer i boliger, hvor fugtkilder, udluftningsadfærd og udeforhold varierer, kan ske deponering i de tunge bygningskonstruktioner. En sådan deponering kan være et attraktivt virkemiddel til at udjævne indeluftens fugtindhold. Hvis fugten tilstrækkelig hurtigt kan optages i konstruktionerne, vil de højeste og for indeklimaets kvalitet mest problematiske fugtniveauer eventuelt kunne undgås. Dette forudsætter endvidere, at konstruktionerne får mulighed for senere at afgive fugten igen. Dette kan enten ske ved mere direkte desorption til indeluften i perioder med lave niveauer eller ved diffusion gennem klimaskærmen til udeluften.



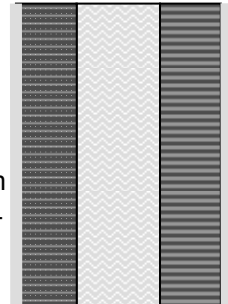
Metode

Feltforsøg

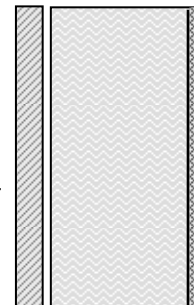
Tre eksisterende boliger blev valgt til forsøgene:



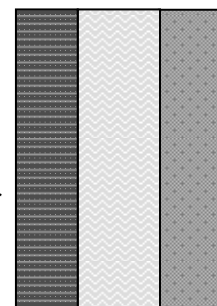
Fuldmuret hus med indfarvet kalkpuds, beliggende i Rødvig. Måling er startet den 16. marts 2006. Huset vil i kort form blot blive benævnt *Fuldmuret hus*. Vægkonstruktionerne er udefra opbygget af 15 mm indfarvet kalkpuds, 108 mm massiv tegl, 125 mineraluld, 108 mm hultegl og 15 mm indfarvet kalkpuds.



Træhus med akrylmaledede gipsplader, beliggende i Hørsholm. Måling er startet den 8. marts 2006. Huset vil i kort form blot blive benævnt *Træhus*. Vægkonstruktionerne er udefra opbygget af udvendig træbeklædning af 25 mm gran, 200 mm mineraluld, dampspærre og 13 mm akrylmalet gipsplade.



Muret hus med akrylmalet letbeton indvendigt, ligeledes beliggende i Hørsholm. Måling er startet den 22. maj. Huset vil i kort form blot blive benævnt *Muret hus*. Vægkonstruktionerne er udefra opbygget af formur af 108 mm massiv tegl, 125 mm mineraluldsisolering og 100 mm letbeton.



De tre huse er udvalgt som repræsentative for bygninger, der primært er opbygget af de tre vægtyper, der ønskes undersøgt. Det fuldmurede hus er her et mere ekstremt tilfælde med kalkpuds både indvendigt og udvendigt, mens både træhuset og det murede hus repræsenterer mere nutidige og almindelige byggestile. For byggeteknisk beskrivelse af de tre huse henvises til Tabel 1 samt Bilag 1.

Instrumenter og målemetoder

Før kogning af vand blev der opsat en Gimini TinyTagUltra (model TGU-1500) udendørs på et solafskærmet sted med det formål at måle og lagre

udendørs temperatur og relativ luftfugtighed. Der blev foretaget måling hvert minut. Målingen af indeluftens fugtighed og temperatur blev på sammen måde udført med Gimini TinyTagUltra datalogger. Luftskiftet i målerummet blev målt på baggrund af henfaldet af sporgassen dinitrogenoxid (lattergas) under opblanding med to bord-ventilatorer placeret i boligen. Koncentrationen af sporgas blev målt med Brüel & Kjær multi-gasanalytator (type 1302) kalibreret til at måle lattergas. Luftindtaget til gasanalytatoren og dataloggeren for temperatur og fugtighed blev opstillet centralt i målerummet i en højde af ca. 90 cm.

Boligerne havde alle et køkken-alrum, der blev anvendt til målingerne. Døre til rum udenfor denne målezone blev lukket ved forsøgets start. Beboerne blev opfordret til så vidt muligt at holde døre og vinduer lukkede i måleperioden. For at minimere tilførsel af vanddamp ifm. madlavning, blev der udleveret aftensmad til beboerne den første dag. Samtidig blev beboerne opfordret til at minimere fugtkilder i målezonen de følgende to dage.

Målingerne havde en varighed på minimum 40 timer. Først i måleperioden blev der ved hjælp af to elkogere kogt vand, indtil indeluftens relative fugtighed medførte tydeligt vandafslag på vinduer i målerummet. Elkogere med vand blev vejret før og efter afkogningen for at bestemme den afdampede vandmængde. Efter afsluttet måling blev udstyret taget ned.

Tabel 1 viser grundlæggende oplysninger om de tre huse og målerummene. Husenes areal er baseret på oplysninger fra BBR, mens øvrige oplysninger er målt eller observeret under besøgene. Det fremgår her, at målerummet i det murede hus har det største areal efterfulgt af træhuset og med målerummet i det fuldmurede hus som det mindste af de tre.

Tabel 2 viser estimerede fugtbelastninger i husene. Oplysningerne er estimeret på baggrund af antallet af beboere og forventninger til deres brug af husene. Det fremgår af tabellen, at udetemperaturen var lav under målingerne i træhuset og lidt højere i det fuldmurede hus, mens den var markant højere under målingerne i det murede hus.

Tabel 1 Byggeteknisk data og luftskifte for de tre huse

	Fuldmuret hus	Træhus	Muret hus
Indvendigt vægmateriale	Indfarvet kalkpuds på tegl	Malet gips over dampspærre	Malet letbeton
Udvendigt vægmateriale	Indfarvet kalkpuds på tegl	Malet træ	Tegl
Husets areal m ²	137	106	142
Målerummets areal m ²	33,4	39,1	59,2
Loftshøjde m	2,34	2,75 (2,27-3,23)	2,40
Målerummets volumen m ³	78,16	107,53	142,08
Luftskifte h ⁻¹	0,42	0,25	0,48
Vælgareal m ²	48,4	45,2	95,5

Tabel 2 Fugtblastning i de tre huse samt temperaturerne inde og ude

	Fuldmuret hus	Træhus	Muret hus
Fugt fra personer, kg/døgn ¹	0,67	1,67	1,67
Øvrig fugt, kg/døgn ²	1,33	1,33	1,33
Samlet, kg/døgn	2,0	3,0	3,0
Gennemsnitlig fugtblastning, g/h	85	125	125
Afkøgt vand, kg	1,368	1,023	1,602
Middel udetemperaturer, °C	4,1	-2,1	11,6
Middel indetemperaturer, °C	21,8	21,2	22,3
Middel vandindhold ude, g/m ³	4,39	3,03	9,35

¹ Fugtblastningen er anslået på baggrund af personbelastning i måleperioden. Der er antaget at en person afgiver 70 g/time svarende til 1,67 kr/døgn.

² Fugtblastningen er anslået på baggrund af rummenes brug.

Kilder til usikkerhed

Aktiviteter i huset under måleperioden er til dels ukendte, hvilket kan have medført variationer i den indendørs fugtblastning.

Forsøgene blev gennemført med kun et hus og en måleserie i hver kategori. Målingerne kan derfor ikke umiddelbart generaliseres til alle huse af de nævnte typer. Målingerne i det murede hus med akrylmalet letbeton blev foretaget ca. to måneder efter målingerne i de to andre huse under noget varmere og mere fugtige udendørsforhold. De højere temperaturer og det større vandindhold har resulteret i, at den relative betydning af vandafkogningen har været lidt mindre i dette hus, og at bestemmelsen af materialernes betydning for fjernelse af vanddamp fra indeluften dermed har været mere usikker.

Feltforsøgets autoritet kan i nogen grad diskuteres i relation til hvor stor betydning afkogning af 1-2 kg vand har i forhold til den samlede fugtproduktion i målerummets indeluft i den målte periode. Her har det af hensyn til beboerne i de tre boliger ikke været ønskværdigt at belaste indeklimaet i generende grad. Samtidig havde forsøget til hensigt at simulere beboerrelaterede fugtudledninger som madlavning, bad eller strygning, der over en så kort periode næppe afdamper større vandmængder end gennemført under forsøgene.

Det skal yderligere bemærkes, at indeluftens relative luftfugtighed er afhængig af udeforholdene. Udover vægmaterialernes betydning for den absorberede fugtmængde, må gulv, loft og eventuel møblering i målerummene også tillægges nogen betydning. Eksempelvis vil gulv af bøgemarket (i træhuset og det murede hus) have betydning husenes samlede fugtbufferkapacitet.

Perioden for målinger har været kort i forhold til i fuldt omfang at kunne redegøre for vægmaterialernes adsorptions- og diffusionsegenskaber. Men efter 40 timer har betydningen af afkogningen været lille i forhold til rummenes normale fugtblastninger, og det har efter så lang tid ikke været muligt at fremvise dens særlige betydning.

Modelberegninger

Med baggrund i den afkogte vandmængde, øvrige fugtkilder, tilført udeluft samt inde- og udeluftens vandindhold kan følgende differentialligning opstilles for indeluftens vandindhold under forudsætning af, at der ikke sker fugttransport til og gennem klimaskærmen. Anvendte værdier for indendørs fugttilførsel fremgår af

Tabel 2.

$$(1) \quad \frac{dv_i}{dt} = n(v_e - v_i) + \frac{G}{V}$$

Hvor

v_i er dampkoncentration indendørs [g/m^3]

v_e er dampkoncentration udendørs [g/m^3]

n er antal luftskifter [h^{-1}]

G er fugtproduktion [g/h]

V er rumvolumen [m^3]

Differentialligningen løses med Laplace transformation. Dermed fremkommer følgende model for indeluftens vandindhold, efter at vandafkogningen er afsluttet:

$$(2) \quad v_i(t) = v_e(t) + (v_i(t_1) - v_e(t)) \cdot e^{-nt} + \frac{G}{Vn}(1 - e^{-nt})$$

Formlen benytter ovenstående benævnelser samt

t og t_1 er henholdsvis den aktuelle tid og tiden, hvor vandafkogningen stopper [h]

Fugtproduktionen har i overvejende grad været bestemt af den afkogte vandmængde under afkogningen, mens beboernes adfærd og øvrige fugtkilder har fået stadig mere afgørende betydning i den resterende periode. Fugtproduktionen i den resterende periode, luftskiftet og målerummets volumen er antaget konstante og som vist i Tabel 1 og 2.

Dampkoncentrationen indendørs er beregnet i små step af 1 minut baseret på den indendørs dampkoncentration ved måleperiodens start, løbende målinger af dampkoncentrationen udendørs og konstante værdier for øvrige parametre.

Da modellen ikke medtager fugtabsorption og -diffusion i materialerne, vil en difference mellem målinger og model illustrere omfanget af absorption og desorption af vand under feltforsøget.

Simuleringer i BSim

Der er parallelt med feltundersøgelsen foretaget simuleringer i programmet BSim af de varme- og fugttekniske forhold i de tre hustyper. Der er gennemført fire sæt af simuleringer:

- 1 Simuleringer for de tre huse med det formål så vidt muligt at gengive måleperiodens fugt- og termiske forhold.
- 2 Helårssimuleringer med referenceårsdata med udgangspunkt i en formodet anvendelse af husene.
- 3 Helårssimuleringer ved brug af geometrien for det fuldmurede hus, idet der på skift regnes med de konstruktioner, der forefindes i de tre udvalgte huse.
- 4 Helårssimuleringer ved brug af geometrien for det fuldmurede hus med ovennævnte konstruktioner. Træhusets og det murede hus' vægge er her antaget at være uden overfladebehandling.

For en gennemgang af beregningsgrundlaget for de fire simuleringer, herunder dokumentation af BSim simuleringerne for de tre huse, henvises til Bilag 3.

Bygningsbeskrivelser

Data for husene er indtastet i BSim efter de foreliggende bygningsbeskrivelser suppleret med data om bygningernes orientering fra den Offentlige Informationsserver, ois.dk. Der er desuden aflagt et besøg ved husene i Hørsholm, hvormed det har været muligt at få et indblik i evt. skyggegivende forhold som fx tagudhæng. Forsøg og bygningsbeskrivelser har i visse tilfælde kun omfattet nogle af bygningens rum, hvorfor der til simuleringerne er gjort fornødne simple antagelser om resten af husenes rum og udformning. Redegørelsen for bygningernes forhold fremgår af Bilag 1.

Klimaforhold

Udeklimaet er ikke løbende blevet målt på de respektive lokaliteter. Da der viste sig mulighed for at få vejrdata med solstråling fra en målestation på DTU i Kgs. Lyngby ca. 10 km syd for Hørsholmhusene, blev det valgt at benytte disse. Målingerne fra DTU indeholder til gengæld ikke registreringer af de udendørs fugtforhold. Det er valgt at sætte den til enhver tid værende dugpunktstemperatur lig med den koldeste temperatur den foregående nat – dette vil i almindelighed give en god tilnærmelse til de udendørs fugtforhold.

I de tre perioder, hvor målingerne i husene fandt sted blev udendørs temperatur og relativ fugtighed målt i forløb af få dages varighed. For disse perioder, er de af SBI målte data blevet omsat til timemiddelværdier og anvendt i stedet for data fra DTU.

Kilder til usikkerhed

Der har som grundlag for simuleringerne kun været sparsomme oplysninger om de faktiske aktiviteter i de tre huse, her primært i forhold til beboerrelateret fugtproduktion og ventilation. Endvidere knytter sig særlig usikkerhed til fastsættelsen af fugtens indtrængningsdybde i væggen, hvilket igen afhænger af materialets tykkelse og overfladebehandlingens beskaffenhed. Dermed kan beregningerne med BSim af forskellige vægkonstruktioners evne til at udjævne indvendige fugtniveauer i forbindelse med forskellige fugtbelastninger som badning, madlavning eller tøjtørring kun gennemføres med betragtelig usikkerhed.

Eksperimentelt er denne usikkerhed dog søgt reduceret. Ved pludselig kendt vanddamptilførsel til nogle rum med karakteristiske vægkonstruktioner og løbende måling af luftskifte og luftfugtighed har det i kombination med simuleringer været muligt at estimere de forskellige vægges evne til at optage og afgive fugt. Dermed har det i nogen grad været muligt at kalibrere modellen med baggrund i målingerne. Simuleringerne giver på den baggrund lejlighed til at undersøge mulighederne for at simulere de faktiske forhold for fugtoptag i BSim, hvilket der tidligere kun i begrænset omfang er gjort erfaringer med. Dog har det eksperimentelt ikke været muligt at inkludere den fugtbufferkapacitet, der potentielt ligger i loft- og gulvmaterialer samt i eventuel møblering.



Resultater

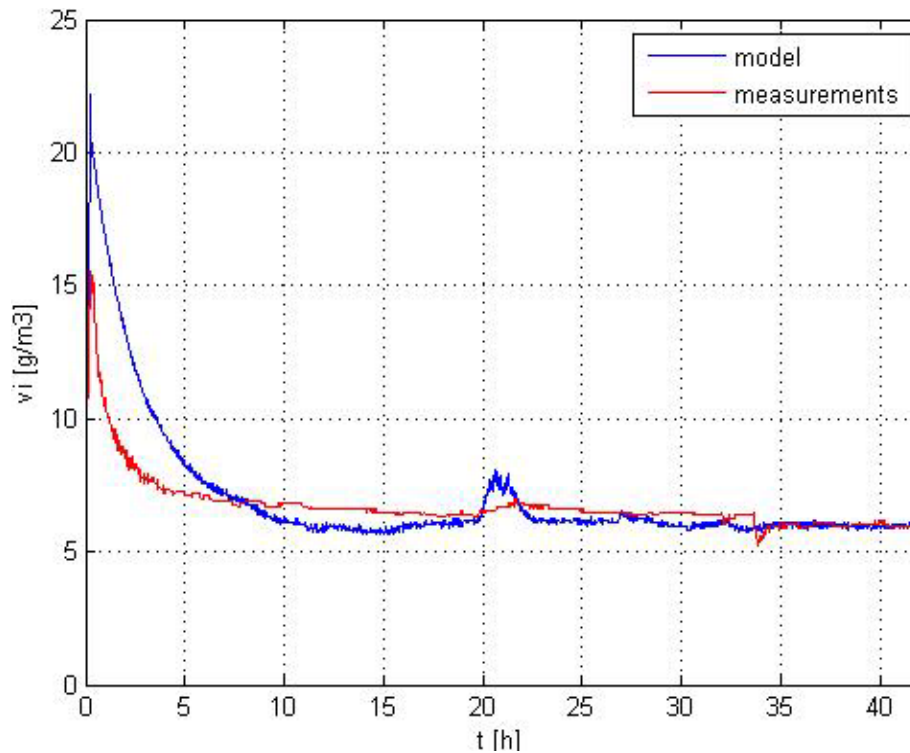
Feltforsøg og modelberegninger

Målingerne sammenholdes med modelberegninger, der ikke medtager en eventuelt absorberet vandmængde, for herigennem at give et billede af den absorberede vandmængde i konstruktionerne i de tre bygninger.

Figur 1 viser målte og modellerede værdier for vanddampkoncentrationen i indeluften som funktion af tiden for det fuldmurede hus. Det ses, at den målte vanddampkoncentration i indeluften er lavere end for modellen de første ca. 8 timer efter fugttilførslen. Arealet mellem de to kurver angiver, for hver kubikmeter luft der udskiftes i huset, approksimativt den absorberede vandmængde i konstruktioner og inventar. Kurverne krydser hinanden efter de nævnte 8 timer, hvorefter modellen angiver en lavere dampkoncentration i indeluften end målingerne viser. Denne difference angiver approksimativt den fra væggen desorberede vandmængde til indeluften.

Der konstateres en momentvis stigning i den beregnede dampkoncentration ca. 20 timer efter måleperiodens start, hvilket afviger fra de målte koncentrationer. Stigningen tilskrives en pludselig stigning i udeluftens vanddampindhold og afvigelsen skyldes, at de udendørs forhold slår for kraftigt igennem i en model uden materialernes udjævnende virkning.

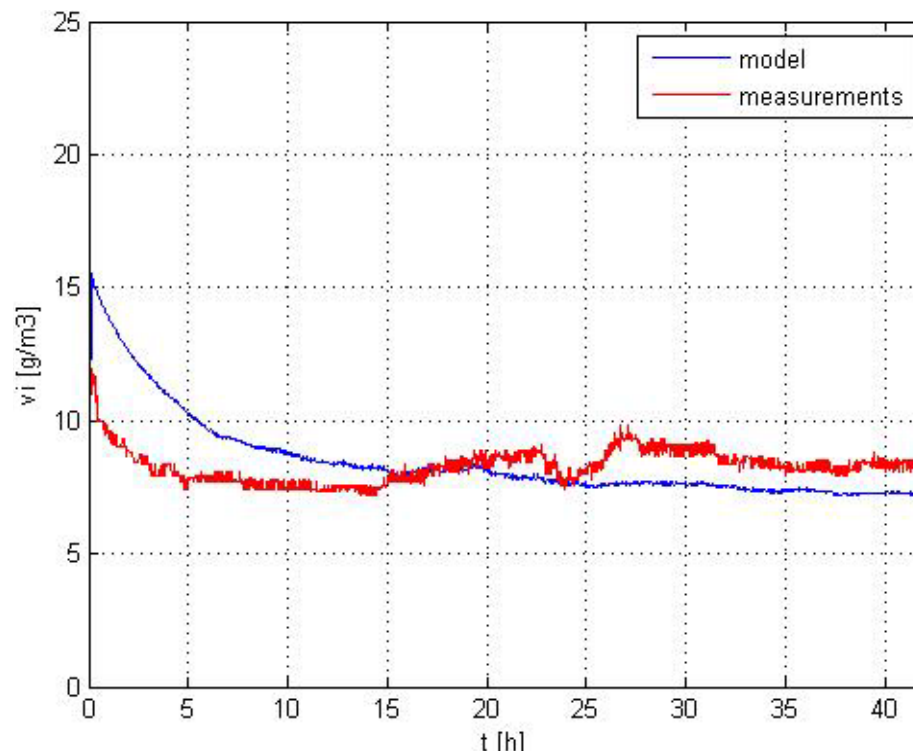
Ca. 34 timer efter fugtafgivelse udlignes forskellene mellem de to grafer.



Figur 1: Vanddampkoncentrationen indendørs (v_i) som funktion af tiden (t) ifølge målingerne og modellen uden absorption i fuldmuret hus med indfarvet kalkpuds. Målingerne startede den 16. marts 2006 kl. 13.

Tilsvarende viser Figur 2 vanddampkoncentrationen i indeluften som funktion af tiden ifølge målinger og modelberegninger for træhuset. Det ses, at den målte vanddampkoncentration i indeluften er lavere end for modellen de første ca. 15 timer efter den kontrollerede fugtafgivelse. Differencen mellem de to kurver angiver her igen et mål for den absorberede vandmængde i konstruktioner og inventar. Herefter krydser kurverne, hvorefter modelberegningerne angiver en lavere dampkoncentration i indeluften end det målte forløb. Denne difference angiver også her et mål for den fra materialerne desorberede vandmængde til indeluften.

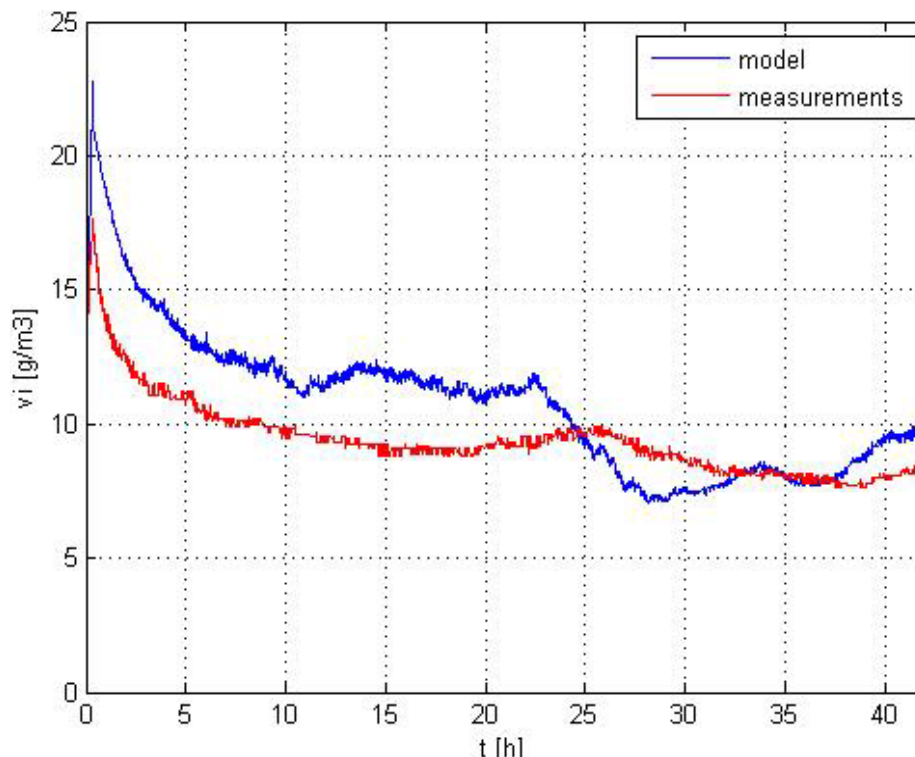
Der konstateres et momentvist fald i den målte dampkoncentration ca. 23 timer efter fugtafgivelse efterfulgt af en stigning. Faldet kan formodentlig tilskrives beboernes udluftningsadfærd. Differencen mellem de to grafer udliges ikke i måleperioden.



Figur 2: Vanddampkoncentrationen indendørs (V_i) som funktion af tiden (t) ifølge målingerne og modellen uden absorption i træhus med akrylmaalede gipsplader. Målingerne startede den 8. marts 2006 kl. 16.

Endelig viser Figur 3 tilsvarende vanddampkoncentrationen i indeluften ifølge målingerne samt modelberegningen for det murede hus. Målingerne i dette hus foregik i maj måned, hvor den noget varmere udeluft havde større betydning for vandindholdet i indeluften. Sammenfaldet mellem model og målinger er her noget dårligere.

Det ses, at den målte vanddampkoncentration i indeluften er lavere end for modellen de første ca. 25 timer efter den kontrollerede fugtafgivelse. Det er længere tid end for de øvrige huse. Det kan skyldes, at udeluftens vandindhold er højt i de første 20 timer, hvorefter både udendørs temperatur og relativ fugtighed falder i de følgende timer. Udeluftens vandindhold falder fra 10 g/m^3 23 timer efter forsøgets start til 5 g/m^3 27 timer efter start. På den baggrund har det været svært at tilpasse de indre fugtkilders styrke i modellen til de faktiske forhold, og vurderingen af vandafkogningens betydning bliver usikker. Vandindholdet i materialerne er således både en funktion af de skiftende udeforhold, vandafkogningen og de indre fugtkilder. Differencen mellem de to kurver angiver dermed et mere usikkert mål for den absorberede vandmængde i konstruktioner og inventar. Kurverne krydser som nævnt efter ca. 25 timer, hvorefter modelberegningerne angiver en lavere dampkoncentration i indeluften end målingerne. Differencen efter kurvernes skæring angiver approksimativt den fra materialerne desorberede vandmængde til indeluften.



Figur 3: Vanddampkoncentrationen indendørs (V_i) som funktion af tiden (t) ifølge målingerne og modellen uden absorption i muret hus med akrylmalet letbeton. Målingerne startede foretaget den 22. maj 2006 kl. 16.

Mængden og varigheden af fugtoptaget i materialerne

Skæringspunktet mellem kurverne for model og målinger angiver tidspunkt for maksimalt vandoptag i materialerne som følge af afkogningen af vand. Figur 1-3 illustrerer her, at fugtabsorptionen i konstruktioner og inventar er forskelligt i de tre bygninger; både hvad angår tid og absorberet mængde.

Den absorberede mængde kan estimeres til arealet mellem modellerede og målte værdier for dampkoncentrationen gange luftskifte og gange volumen af målerummet.

Tabel 3 viser de for figur 1-3 aflæste tidspunkter for hvornår materialerne skifter fra at optage vand til at afgive en del af det optagne vand igen, samt estimerer for den absorberede vandmængde før skiftet for de tre bygninger. For at øge sammenligningsgrundlaget mellem de tre bygninger er der yderligere beregnet estimeret, absorberet vandmængde henholdsvis 4 og 8 timer efter afdampningens start.

Tabel 3 Tiden til materialernes skift fra absorption til desorption af vand og estimeret mængde absorberet vand fra afdampningens start til skiftet

	Fuldmuret hus	Træhus	Muret hus
Tid før skifte til desorption (h)	8,1	15,4	24,7
Estimeret absorberet vandmængde (kg) 4 timer efter afdampningens start	0,6	0,4	1,0
Estimeret absorberet vandmængde (kg) 8 timer efter afdampningens start	0,7	0,6	1,7
Samlet estimeret absorberet vandmængde (kg) i måleperioden inden skift til desorption	0,7	0,8	4,0

Skæringspunkterne for samlet estimeret absorberet vandmængde såvel som de beregnede vandmængder er behæftet med betydelig usikkerhed, særligt fordi differencen mellem henholdsvis den målte og beregnede mængde

bygger på den estimerede indendørs fugtproduktion. De beregnede mængder kan dog ses som et udtryk for materialernes forskellige evne til at absorbere fugt.

Ses der på absorberet vandmængde 4 timer efter afdampningen start, har det murede hus det største estimerede fugtoptag efterfulgt af henholdsvis det fuldmurede hus og træhuset. Efter 8 timer gentager billedet sig. Ses der på den samlede absorberede vandmængde for de tre huse, har det fuldmurede hus på kortest tid det største estimerede fugtoptag efter ca. 8 timer. Til sammenligning har træhuset et skæringspunkt på ca. 15 timer med et sammenligneligt estimeret fugtoptag, mens det murede hus har et skæringspunkt efter mere end 24 timer og placerer sig over træhuset og det fuldmurede hus med hensyn til estimeret fugtoptag.

Det murede hus har dog, som det fremgår af Tabel 1, et betydelig større målerum, og som anført ovenfor er værdien behæftet med større usikkerhed end de øvrige huse på grund af det høje og skiftende vandindhold i udeluft. For at øge sammenligningsgrundlaget yderligere, er de estimerede værdier for fugtabsorption sat i relation til målerummenes vægareal, hvilket er vist i Tabel 4.

Tabel 4 Estimeret absorberet vandmængde efter 4 timer, 8 timer og ved skift til desorption per vægareal i målerummet

	Fuldmuret hus	Træhus	Muret hus
Vægareal i målerummet (m ²)	48,4	45,2	95,5
Estimeret absorberet vandmængde 4 timer efter afdampningens start / vægareal (gram/m ²)	1,24	0,88	1,05
Estimeret absorberet vandmængde 8 timer efter afdampningens start / vægareal (gram/m ²)	1,45	1,33	1,78
Samlet estimeret absorberet vandmængde i måleperioden indtil skift til desorption / vægareal (gram/m ²)	1,45	1,77	4,19

Af Tabel 4 fremgår det, at det fuldmurede hus efter 4 timer har det største estimerede fugtoptag pr. vægareal, efterfulgt af først det murede hus og derefter træhuset. 8 timer efter afdampningens start har det murede hus det største fugtoptag pr. vægareal, efterfulgt af henholdsvis det fuldmurede hus og træhuset. Det skal her bemærkes, at gulvet i målerummene i træhuset og i det murede hus er af bøgemarket, mens gulvet i målerummet i det fuldmurede hus er af marmorfliser. Loftet i målerummene er ligeledes forskelligt i de tre huse, hvor loftet i det fuldmurede hus yderst er af kalkpuds, mens det i træhuset og i det murede hus er af ubehandlet grantræ. Det må på den baggrund formodes, at målerummenes gulv- og loftareal i nogen grad influerer på de tre huses fugtbufferkapacitet.

Simuleringer i BSim

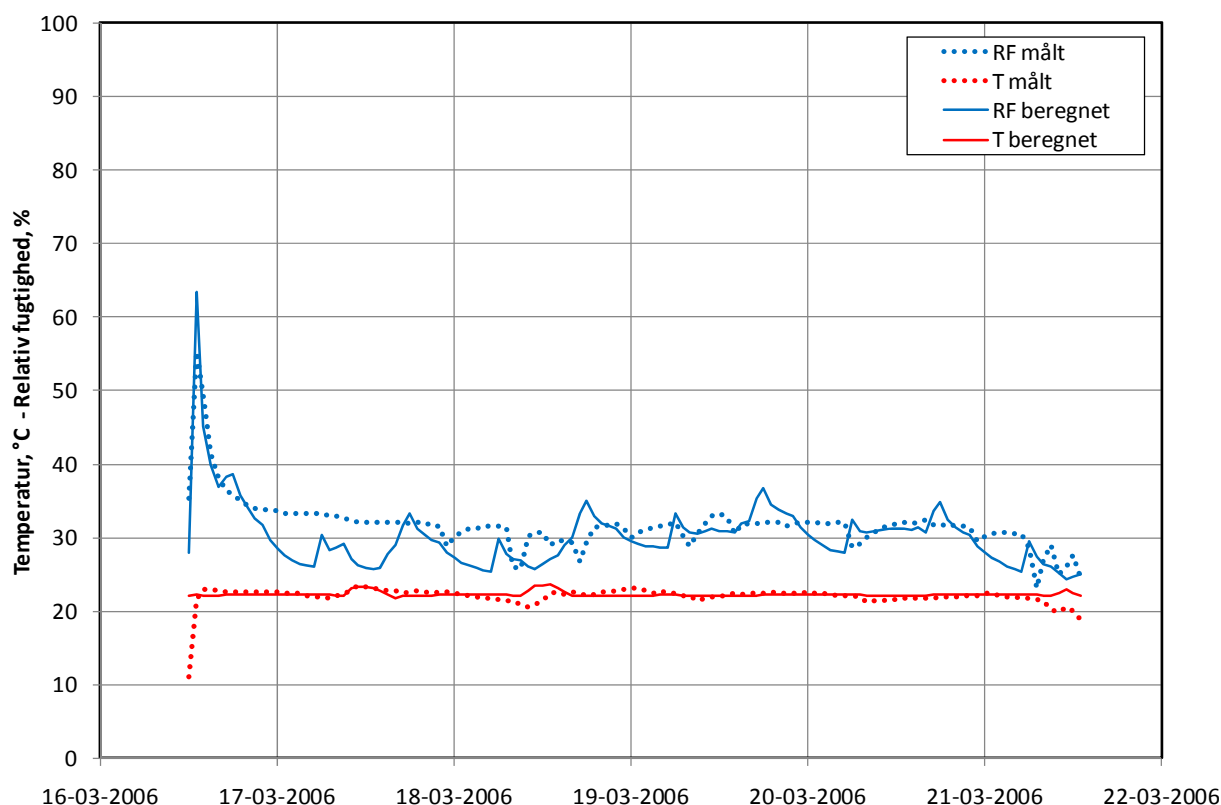
For en udførlig gennemgang af simuleringerne, herunder beregningsgrundlag henvises til bilag 3; for bygningsbeskrivelser henvises til bilag 1. I det følgende gennemgås udvalgte resultater fra simuleringerne. Her gennemgås først simuleringer over nogle få dage i forbindelse med målingerne under feltforsøgene. Herefter gennemgås udvalgte årssimuleringer af temperatur- og fugtforhold med udedata fra referenceår for de aktuelle huse. Efterfølgende gennemgås tilsvarende helårssimuleringer med konstruktioner af ind-

farvet kalkpuds/tegl, gips/træ og mur/letbeton, men med geometri og påvirkning som for det fuldmurede hus. Endelig gentages dette uden indvendig overfladebehandling på gipspladerne i træhuset og letbetonen i det murede hus.

Simuleringer i forbindelse med målingerne i foråret 2006

Figur 4 viser kurverne for henholdsvis det målte og det simulerede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til det fuldmurede hus. Det simulerede og det målte forløb for de termiske forhold i huset følger her tilnærmelsesvist hinanden med mindre afvigelser, der formodentlig kan tilskrives beboernes adfærd.

For de to forløb af den relative fugtighed konstateres først i forløbet en kraftig stigning i den indendørs luftfugtighed som følge af dampudledningen i det fuldmurede hus. Denne stigning er kraftigere for det simulerede forløb end for det målte forløb, idet det simulerede forløb topper ved en relativ fugtighed på ca. 65 % RF, mens det målte forløb topper ved ca. 55 % RF. Samtidig har det simulerede forløb et lidt lavere startniveau på 28 % RF mod målingernes startniveau på 35 % RF. På linie hermed ses også større udsving i den beregnede relative fugtighed end i den målte relative fugtighed igennem forløbet. Dette kan skyldes, at modellen undervurderer absorptionskapaciteten, men også det forhold, at modellens tidsstep på 1 time sammenholdt med målehyppigheden på 60 målinger pr. time, kan bidrage til dette. De to kurver har tilnærmelsesvist samme fugtniveau.

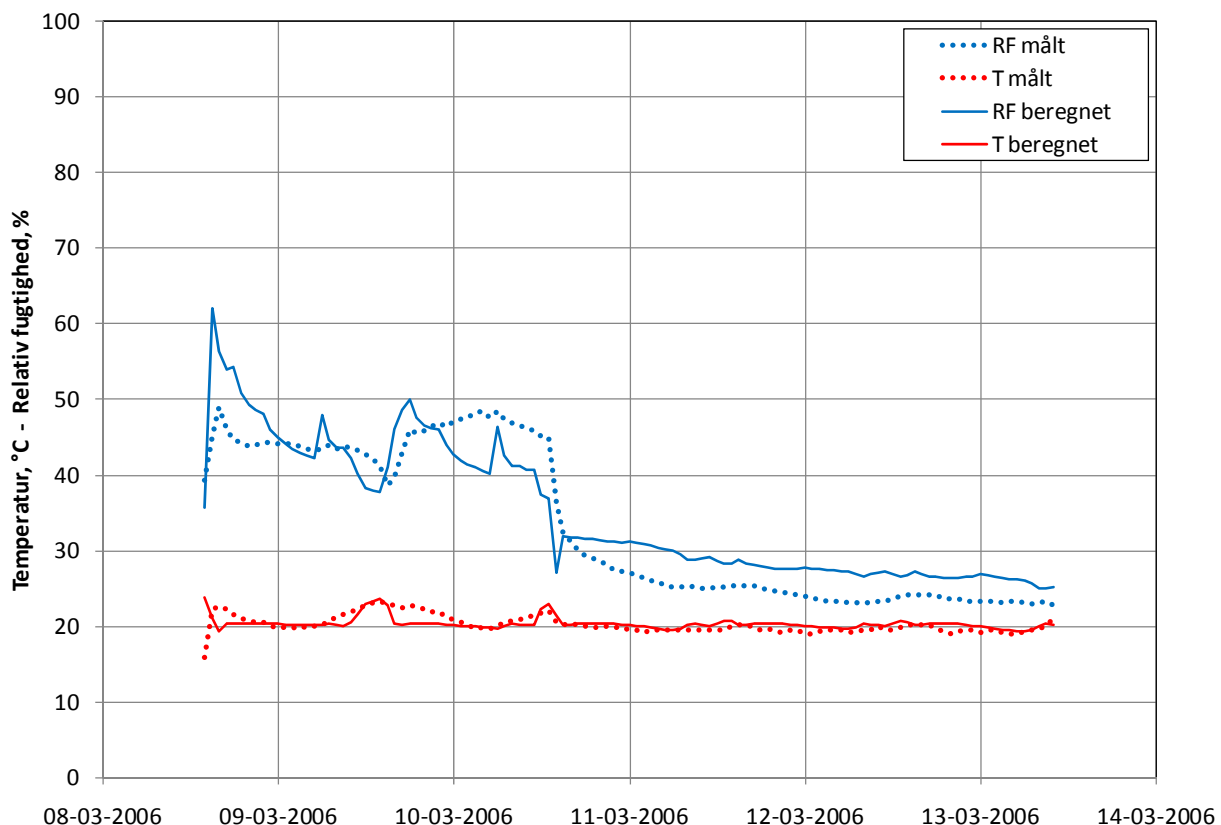


Figur 4 Sammenligning mellem målte og simulerede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til det fuldmurede hus den 16. marts 2006.

Figur 5 viser kurverne for henholdsvis det målte og det simulerede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til træhuset. Det simulerede og det målte forløb for de termiske forhold i huset følger her igen tilnærmelsesvist hinanden med mindre afvigelser, der formodentlig kan tilskrives beboernes adfærd.

For forløbet af den relative fugtighed konstateres her ligeledes en kraftig stigning i den indendørs luftfugtighed først i forløbet som følge af dampudledningen. Denne stigning er kraftigere for det simulerede forløb end for det målte forløb, idet det simulerede forløb topper ved en relativ fugtighed på ca. 58 % RF, mens det målte forløb topper ved ca. 49 % RF. Denne forskel holder sig i ca. hele den periode, hvor vandafkogningen har den største betydning. Samtidig har det simulerede forløb et lidt lavere startniveau (henholdsvis ca. 35 % RF og ca. 39 % RF).

De to kurver har tilnærmelsesvist samme fugtniveau, men der konstateres også her større udsving i det simulerede forløb end i det målte. Efter kl. 13.00 den 10. marts viser begge kurver et fald i indendørs vanddampkoncentration. Det beror på formodningen om, at husets beboere har forladt bygningen, hvilket er afspejlet i det indendørs fugttilskud i modellen.



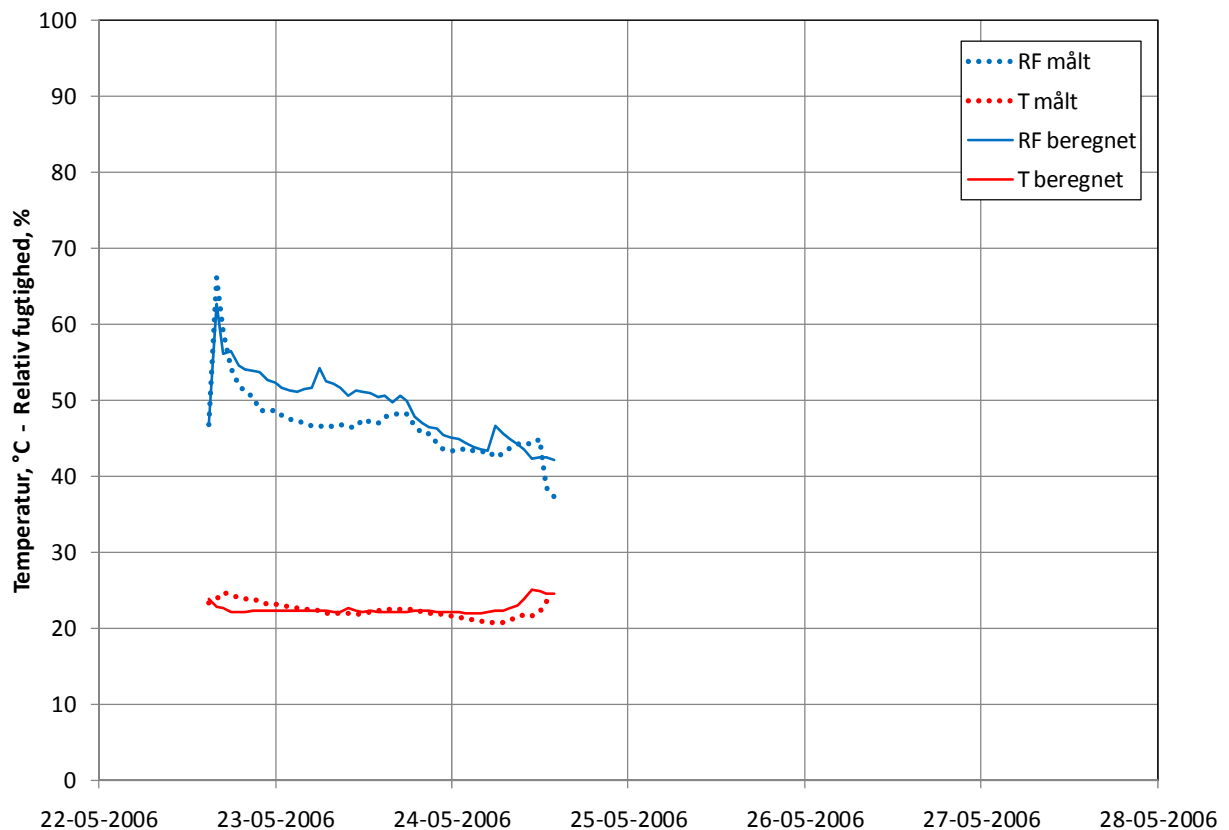
Figur 5 Sammenligning mellem målte og simulerede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til træhuset i den 8. marts 2006.

Figur 6 viser kurverne for henholdsvis det målte og det simulerede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til det murede hus. Det bemærkes her, at måleperioden for det murede hus er 2 døgn modsat måleperioderne for det fuldmurede hus og træhuset, der er henholdsvis 5 døgn og 4 døgn og 20 timer. Det simulerede og det målte forløb for de termiske forhold i huset følger her igen tilnærmelsesvist hinanden med mindre afvigelser, der formodentlig kan tilskrives beboernes adfærd.

For forløbet af den relative fugtighed i Figur 6 konstateres her som for Figur 4 og Figur 5 ligeledes en kraftig stigning i den indendørs luftfugtighed først i forløbet som følge af dampudledningen. Denne stigning er her lidt kraftigere for det målte forløb end for det simulerede forløb, idet det målte forløb topper ved en vanddampkoncentration på ca. 65 % RF, mens det simulerede forløb topper ved ca. 62 % RF.

De to kurver for henholdsvis den målte og den simulerede udvikling i den indendørs vanddampkoncentration i Figur 6 har principielt samme forløb, men

fugtpåvirkningen resulterer i større udslag i det målte forløb, og der konstateres et lidt højere fugtniveau for det simulerede forløb i perioden med faldende relativ fugtighed. Der er således antydningen af, at modellen i dette hus overvurderer betydningen af absorption i konstruktioner og inventar.



Figur 6 Sammenligning mellem målte og simulerede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til det murede hus den 22. maj 2006.

Opsummering på simuleringer i forbindelse med målingerne

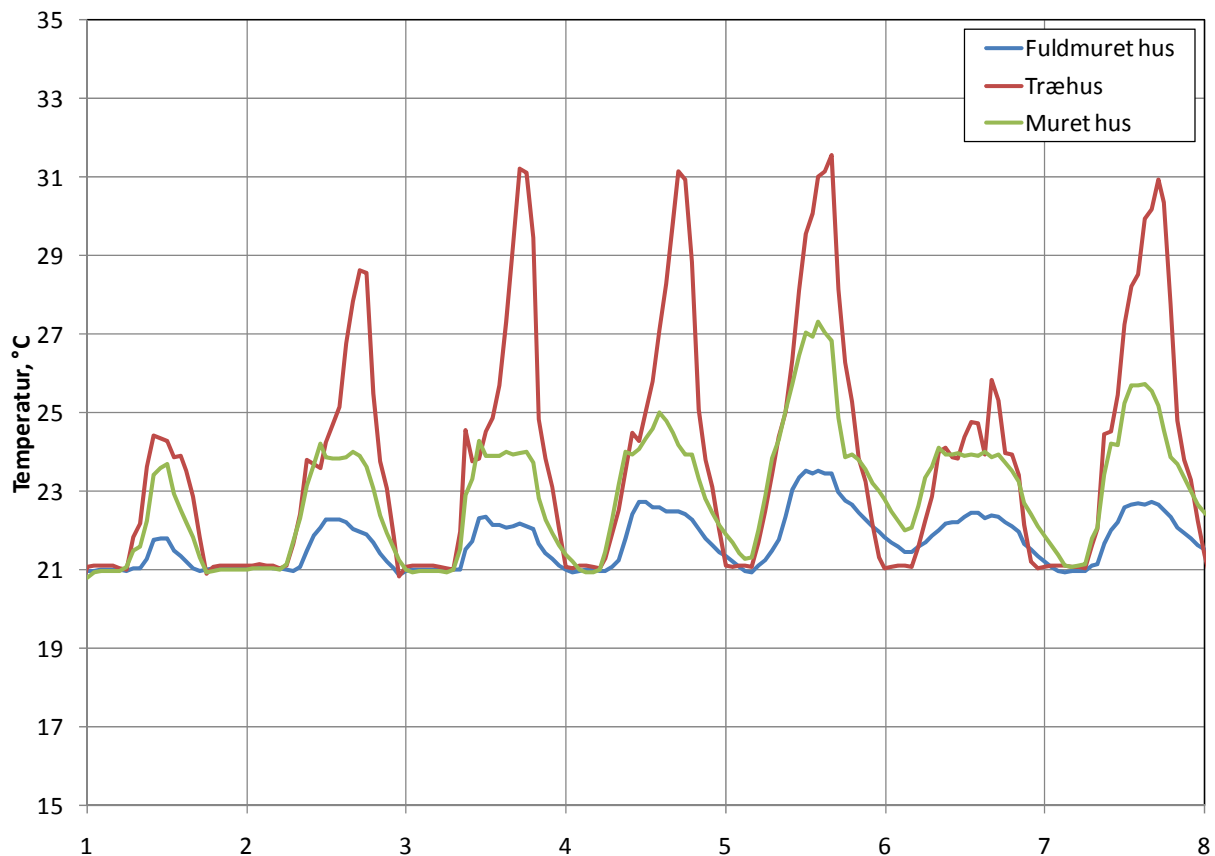
Figur 4, 5 og 6 viser, at det har været muligt at opnå god overensstemmelse mellem målinger og simuleringer med hensyn til de termiske forhold for alle tre huse. Figurerne illustrerer samtidig, at det ikke i helt samme omfang har været muligt at opnå overensstemmelse mellem målinger og simuleringer for de fugttekniske forhold. Betydningen af overfladebehandlinger og inventar har her været vanskelig at forudsige. Datamaterialet antyder, at absorptionen i modellen er undervurderet i det fuldmurede hus og træhuset, mens den er overvurderet i det murede hus.

Årssimuleringer af temperaturforhold

Der er gennemført helårssimuleringer for temperatur-, relativ fugtigheds- og vanddampkoncentrationsforløb for alle tre huse ved benyttelse af normale danske referenceårsdata.

Den indendørs temperatur i husene når i simuleringerne ikke under 21 °C, hvilket skyldes, at der i BSim er regnet med opvarmning med tilstrækkelig effekt under denne temperatur. Der er ligeledes gjort antagelser om øget udluftning ved en indendørstemperatur over 24 °C.

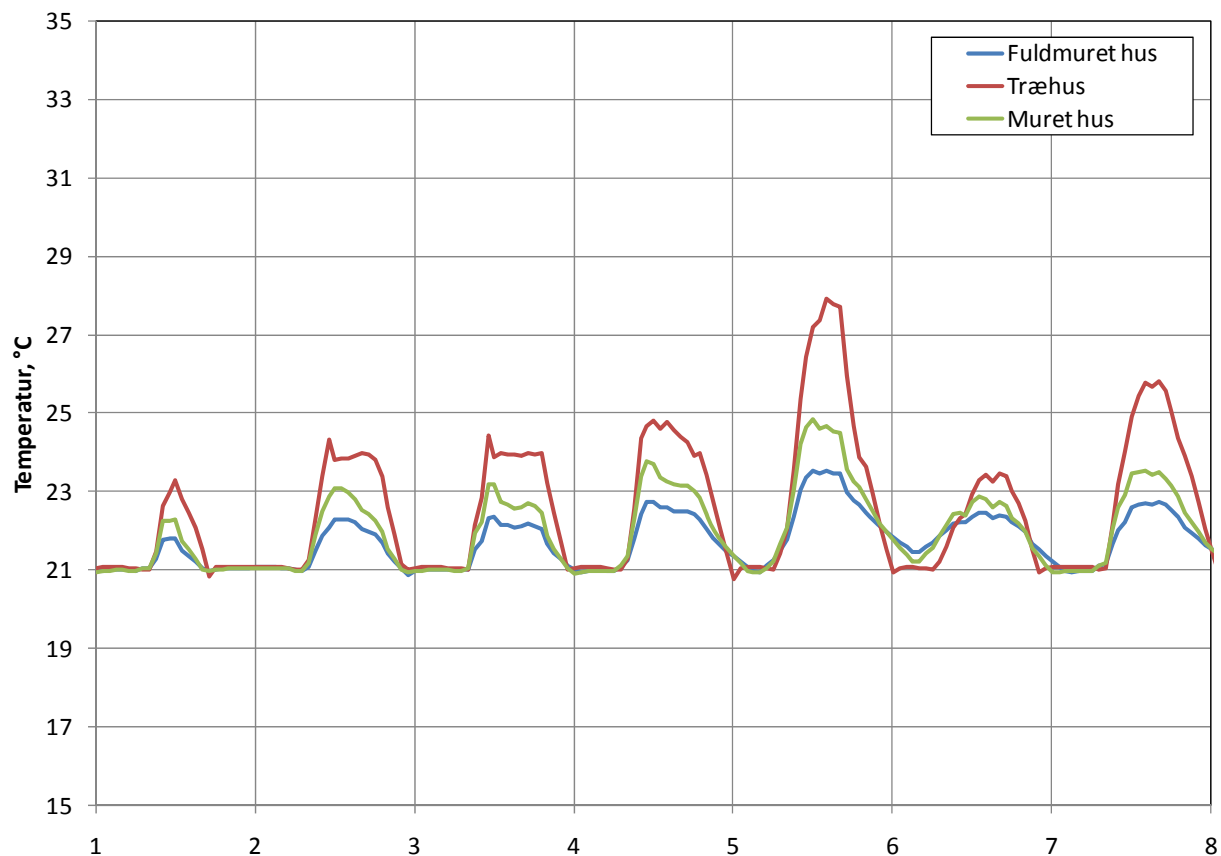
Figur 7 viser simuleringer af temperaturvariationer for første uge i juli for de tre bygninger. Der ses her størst døgnvariation i temperaturudsving for i træhuset, dernæst for det murede hus, og endelig er det fuldmurede hus det mest temperaturstabile. Til sammenligning er månedsmidler af den indendørs lufttemperatur for første uge i juli 2006 for træhuset 23,15 °C, for det murede hus 22,65 °C samt for det fuldmurede hus 21,90 °C.



Figur 7 Indendørs lufttemperatur i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.

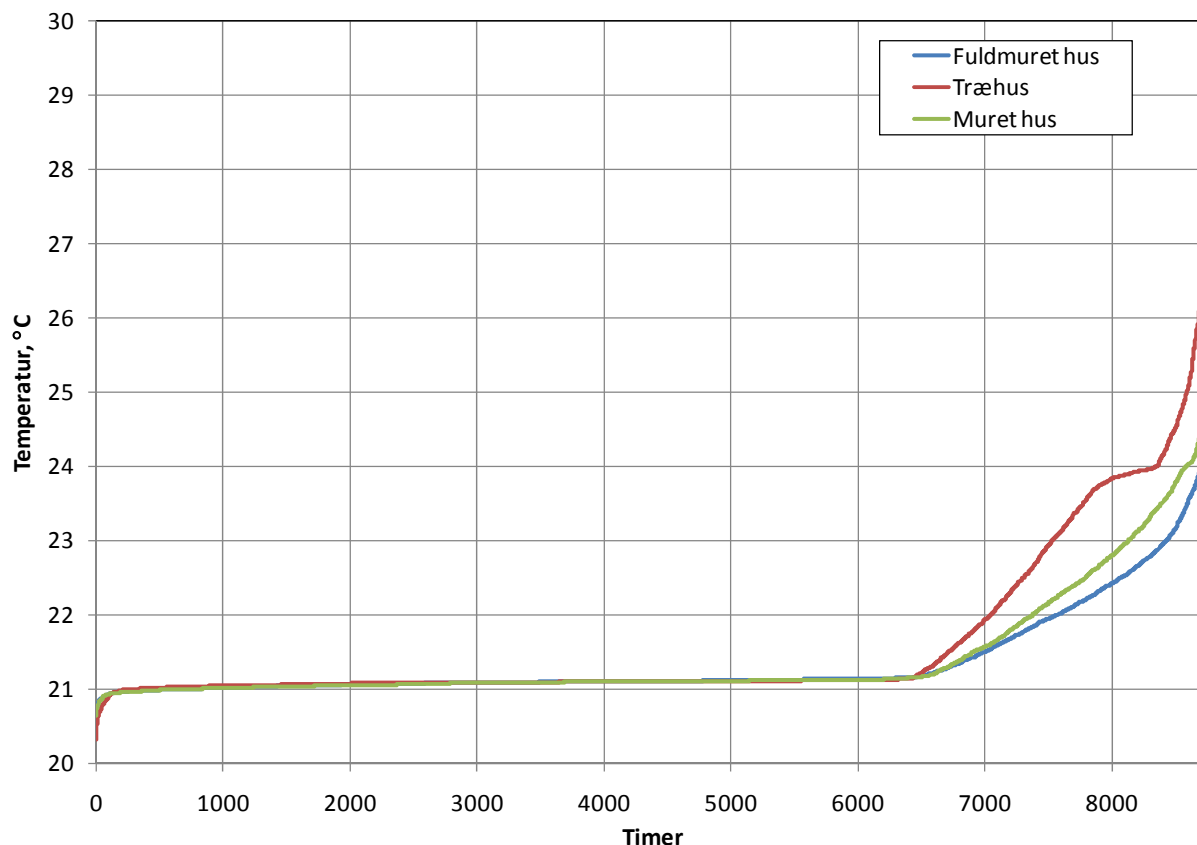
Figur 8 viser simuleringer af temperaturvariationer for første uge i juli med geometri og påvirkning svarende til det fuldmurede hus. Bygningerne er simuleret som henholdsvis puds/tegl -, letbeton/tegl- og gips/trækonstruktioner med de loft- og gulvkonstruktioner, der forefindes i de tre bygninger. Derfor er kurverne for det fuldmurede hus ens i Figur 7 og Figur 8.

Figur 8 viser, at der nu er mindre udsving i indendørstemperaturerne for træhuset end i Figur 7. Forskellen tilskrives de ændrede geometriske forhold, her primært størrelsen og placeringen af vinduer. Træhuset har dog stadig størst temperaturvariationer, mens henholdsvis det fuldmurede hus og det murede hus fremstår som mere temperaturstabile.



Figur 8 Indendørs lufttemperatur i første uge af juli i et hus med samme geometri og orientering som for det fuldmurede hus, men med forskellige konstruktionsvalg. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.

Samme forhold afspejles i Figur 9, der viser varighedskurver for indendørs temperaturer ved helårssimuleringer af det fuldmurede hus, idet der her ligeledes regnes med de konstruktioner, der forefindes i de tre bygninger. Temperaturkurverne følger 21 °C helt op til ca. 6.500 timer af årets 8.760 timer, fordi opvarmningen antages at være i drift hele året. Husene har i de resterende perioder højere temperaturer. Når temperaturerne når over 24 °C er modelleret en øget udluftning, der ses som en udfladning af kurverne omkring denne temperatur. Træhuset ses at have behov for yderligere udluftning i ca. 800 timer, det murede hus i ca. 550 timer og det fuldmurede har kun dette behov i nogle få timer om året.



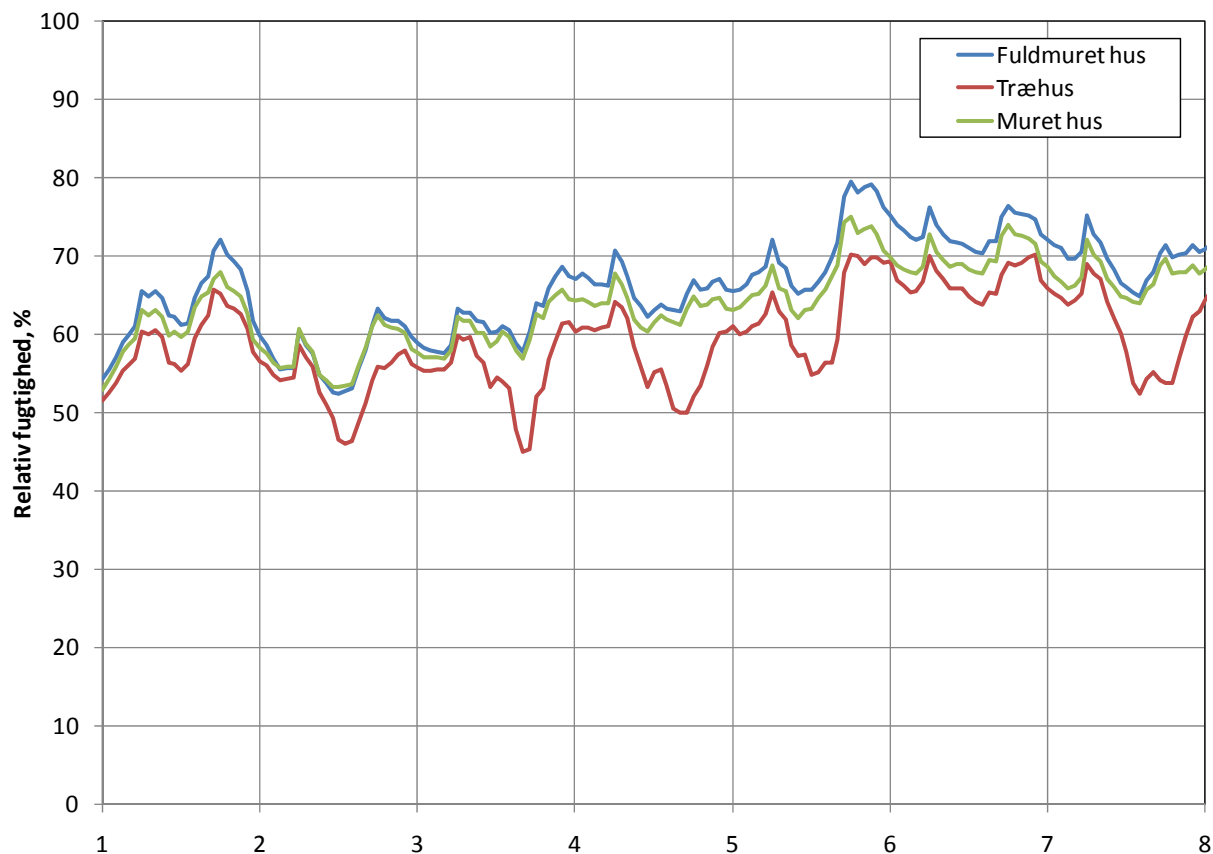
Figur 9 Varighedskurver for indendørs temperaturer i det fuldmurede hus med forskellige konstruktionsvalg.

Simuleringerne i Figur 8 og Figur 9 bekræfter, at det murede hus har et mere temperaturstabil indeklima, medens temperaturvariationerne er størst for træhuset, her primært i den varme periode.

Årssimuleringer af fugtforhold

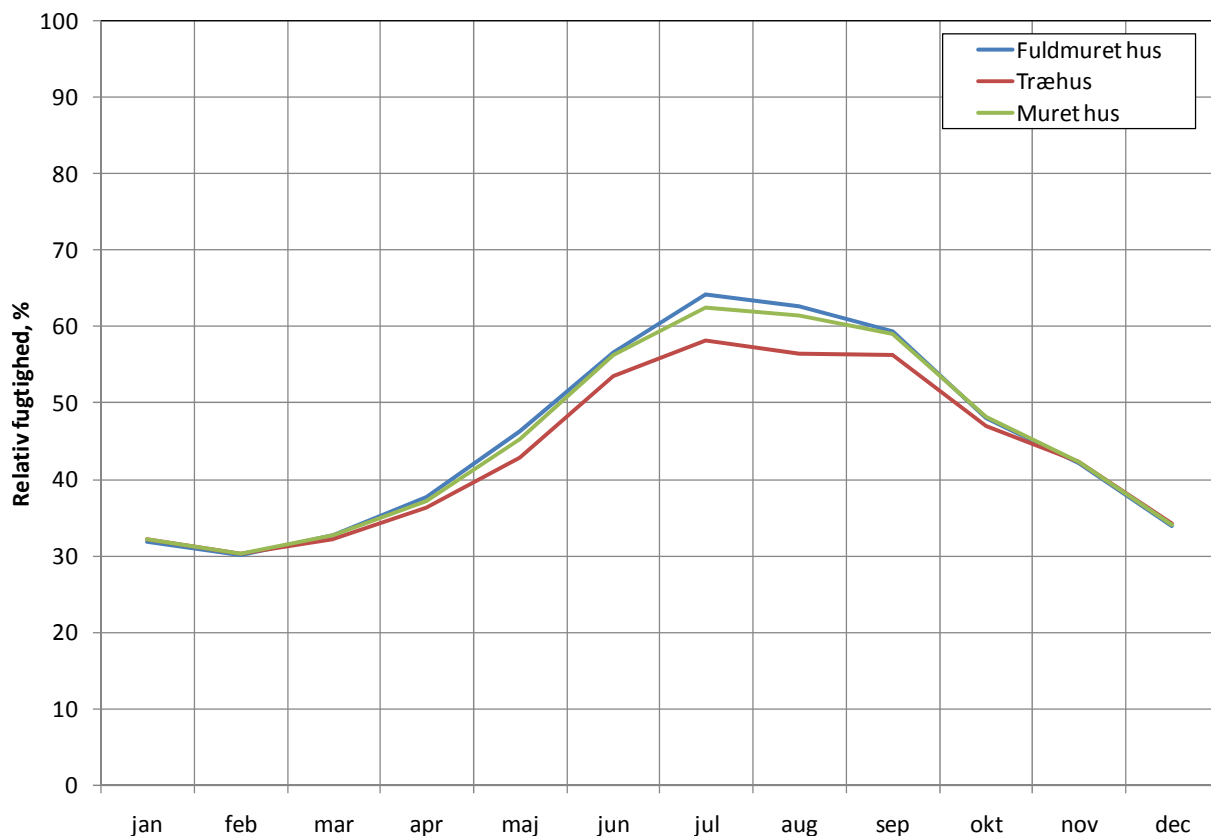
Der er gennemført helårssimuleringer for forløb af den relative fugtighed hvor geometri og beliggenhed for det fuldmurede hus er benyttet, men hvor der igen er regnet med konstruktionsvalg som i de øvrige huse.

Figur 10 viser den indendørs fugtighed i den varme periode for de fiktive huse med overfladebehandling af indvendige vægge. Her ses det, at det fuldmurede hus har den højeste indendørs relative fugtighed med værdier op til 80 % RF efterfulgt af det murede hus med værdier op til ca. 75 % RF og med træhuset som det mest tørre med værdier på til ca. 70 % RF.



Figur 10 Indendørs relativ fugtighed i første uge af juli i det fuldmurede hus med forskellige konstruktionsvalg og overfladebehandling. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.

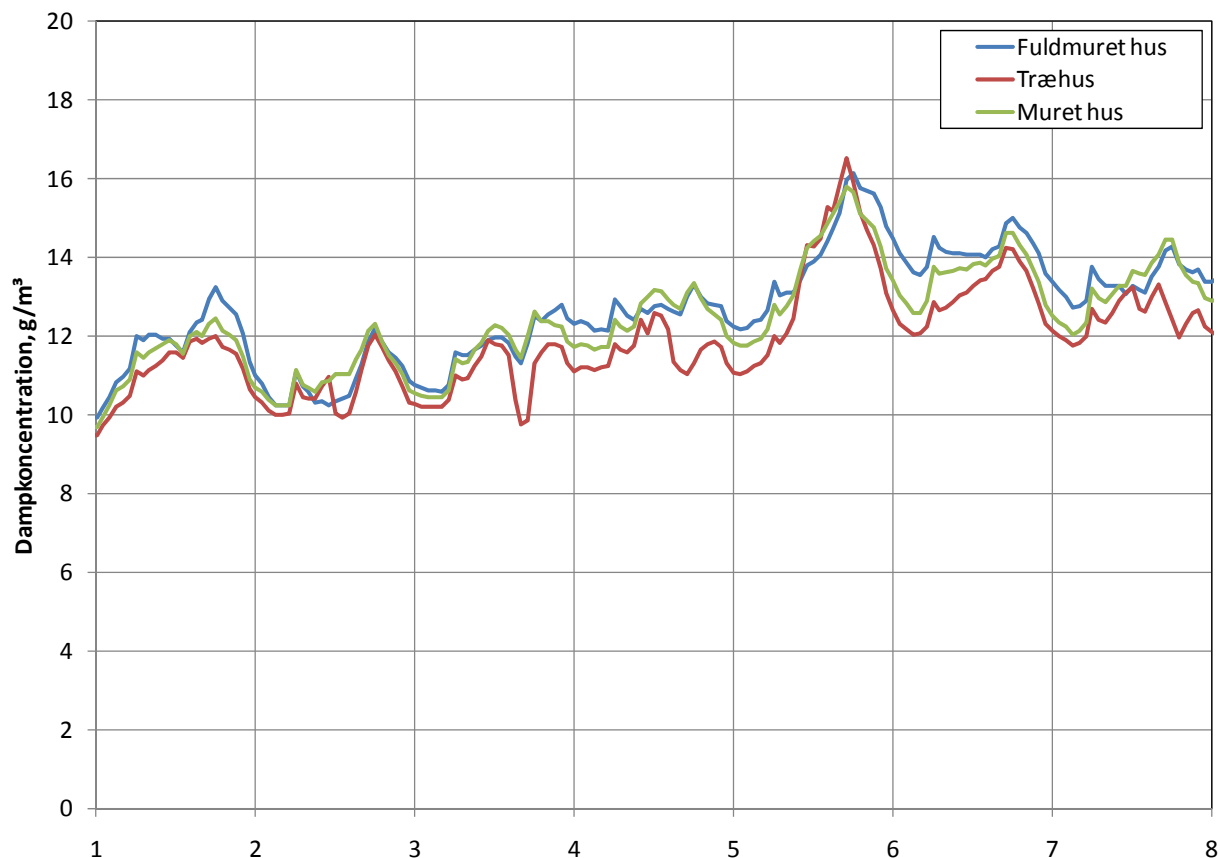
Figur 11 viser månedsmidlerne for den indendørs relative fugtighed, her igen med geometrien for det fuldmurede hus med forskellige konstruktionsvalg. Der konstateres her den største sæsonmæssige variation for det fuldmurede hus efterfulgt af det murede hus, mens træhuset har den mindste sæsonmæssige variation. Tilsvarende betragtninger for vinterperioden viser ikke markante forskelle i indetemperatur og relativ fugtighed i de tre bygninger.



Figur 11 Månedsmidler af den indendørs relative fugtighed i løbet af året i det fuldmurede hus med forskellige konstruktionsvalg og overfladebehandling.

Forskellene mellem de tre konstruktionstyper er tydeligst fra maj til september, mens de relative fugtighedsforløb for de tre huse er sammenfaldende i perioder, hvor den indendørs temperatur er ens – her i årets koldere måneder. Da træhuset har de højeste indendørs temperaturer i sommerhalvåret, vil udluftningen være større, hvilket bevirker, at den indendørs fugtighed vil nærme sig det udendørs niveau og dermed blive lavere. Samtidig giver de højere temperaturer en lavere relativ luftfugtighed.

Forskelle mellem forløbet i de tre huse udjævnes i nogen grad, hvis den indendørs fugtighed opgøres som vanddampkoncentration, hvilket er illustreret i Figur 12, der viser vanddampkoncentrationen for første uge af juli.

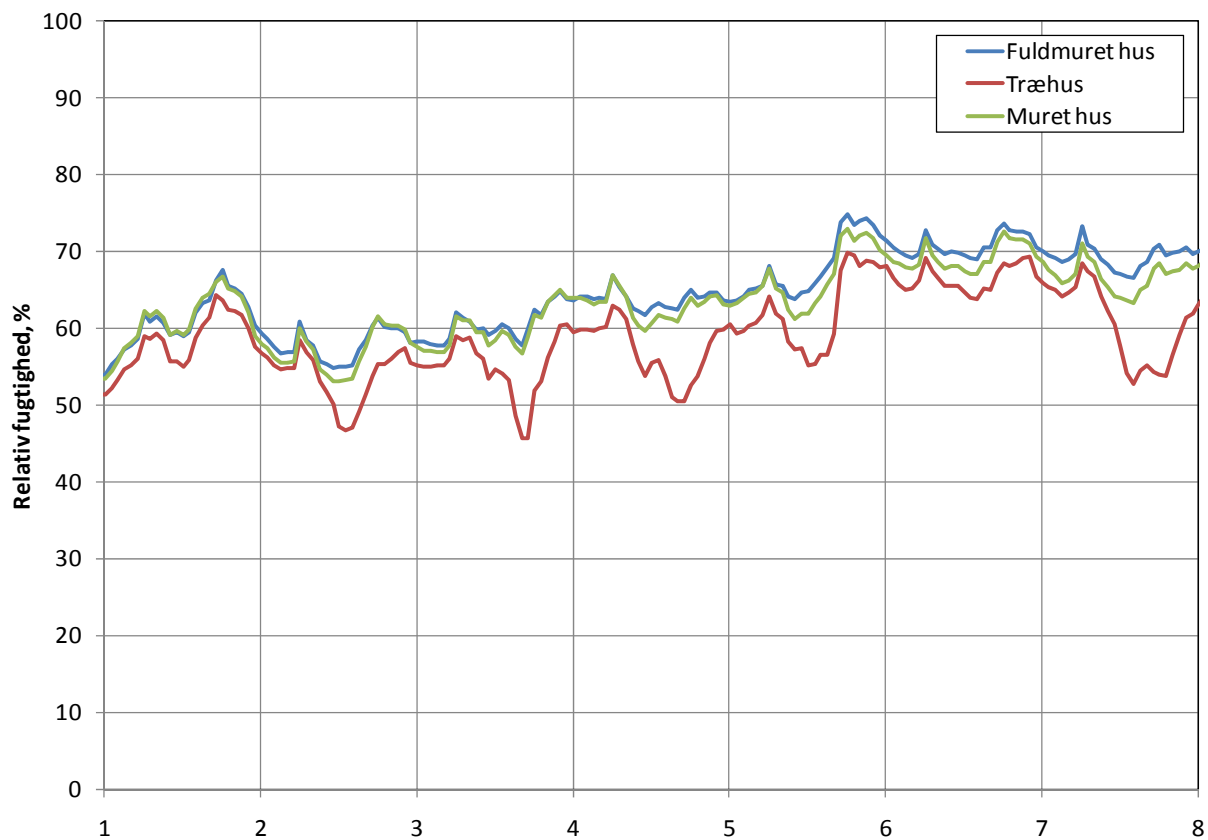


Figur 12 Indendørs vanddampkoncentration i første uge af juli i det fuldmurede hus med forskellige konstruktionsvalg og overfladebehandling. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.

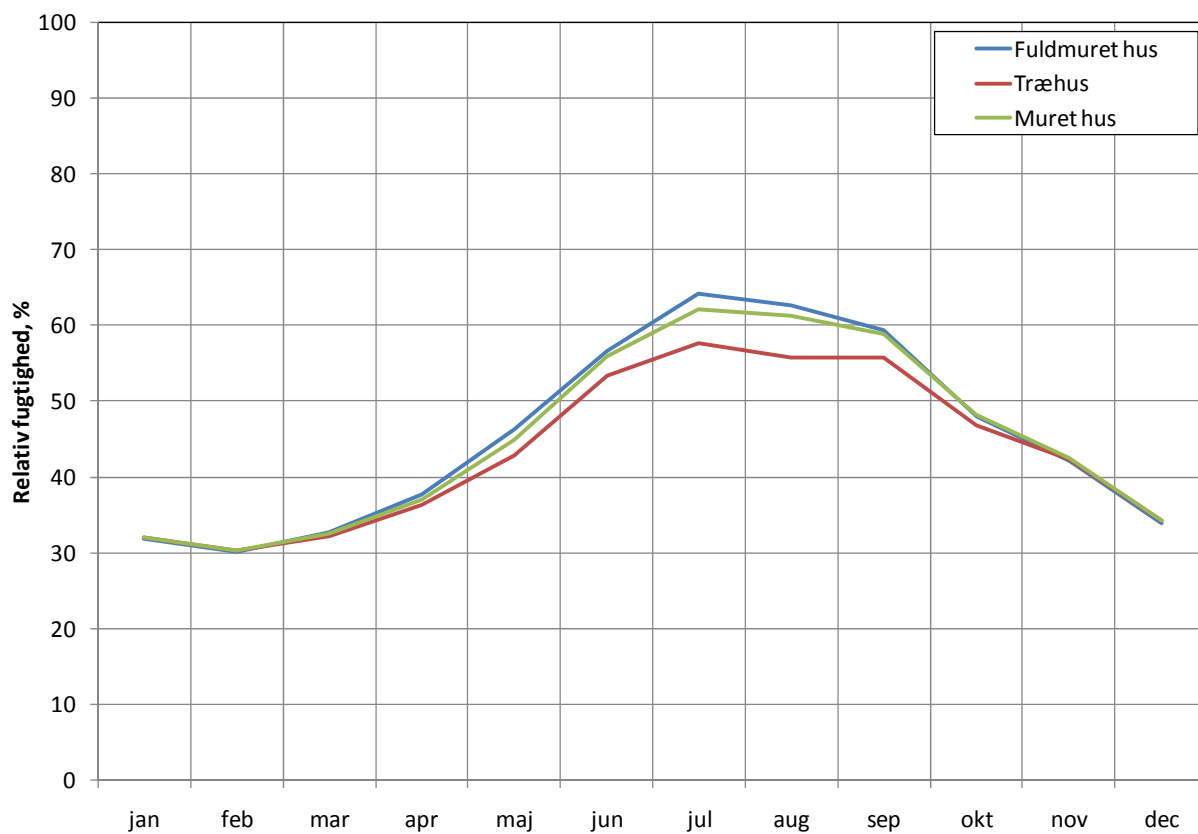
Simuleringer uden overfladebehandling

For at undersøge overfladebehandlingens betydning er der gennemført hel-årssimuleringer for relative fugtighedsforløb for det fuldmurede hus med de tidligere nævnte konstruktionsvalg, hvoraf gips/træ- og beton/teglkonstruktionerne er uden indvendig overfladebehandling. For den fuldmurede konstruktion er den indvendige overfladebehandling af vægge og loft i form af indfarvet kalkpuds bibeholdt.

Figur 13 viser de relative fugtighedsforløb i den varme periode, mens Figur 14 viser månedsmidler for samme. Forløbene for relativ fugtighed er her ikke markant anderledes end for simuleringerne af de tilsvarende bygninger med overfladebehandling. Dog ses der en forskel ved forløbet for det fuldmurede hus, der her nærmer sig forløbet for det murede hus. Denne ændring tilskrives den manglende diffusionsbremsende overfladebehandling af loftet i det fuldmurede hus.



Figur 13 Indendørs relativ fugtighed i første uge af juli i det fuldmurede hus med forskellige konstruktionsvalg og uden overfladebehandling. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 14 Månedsmidler af den indendørs relative fugtighed i løbet af året i det fuldmurede hus med forskellige konstruktionsvalg og uden overfladebehandling.



Diskussion af resultater

Feltforsøg

Trods det, at der kun er foretaget målinger på tre lokaliteter og at datamaterialet dermed er begrænset, vurderes det, at måleresultater i kombination med simuleringerne i BSim viser, at teglkonstruktionen uden anden overfladebehandling end kalkpuds og til dels også tegl/letbetonkonstruktionen udover at udjævne temperaturen også i nogen grad udjævner den indendørs fugtighed. Der kan dog stilles spørgsmålstejn ved hvor autoritative forsøgene er i forhold til at generalisere resultaterne. Der er kun gennemført forsøg i tre huse og den konkrete udformning og indretning af netop disse huse har formentlig haft betydning for resultaterne.

Målerummet i det murede hus var med sine 59,2 m² langt større end målerummene i det fuldmurede hus (33,4 m²) og træhuset (39,1 m²). Det havde derfor også større areal af materialeoverflader, hvorfor der også ses en markant større vandabsorption i dette hus. Det sker dog over en betydelig længere periode og i en tid med faldende vandindhold i udeluften. .

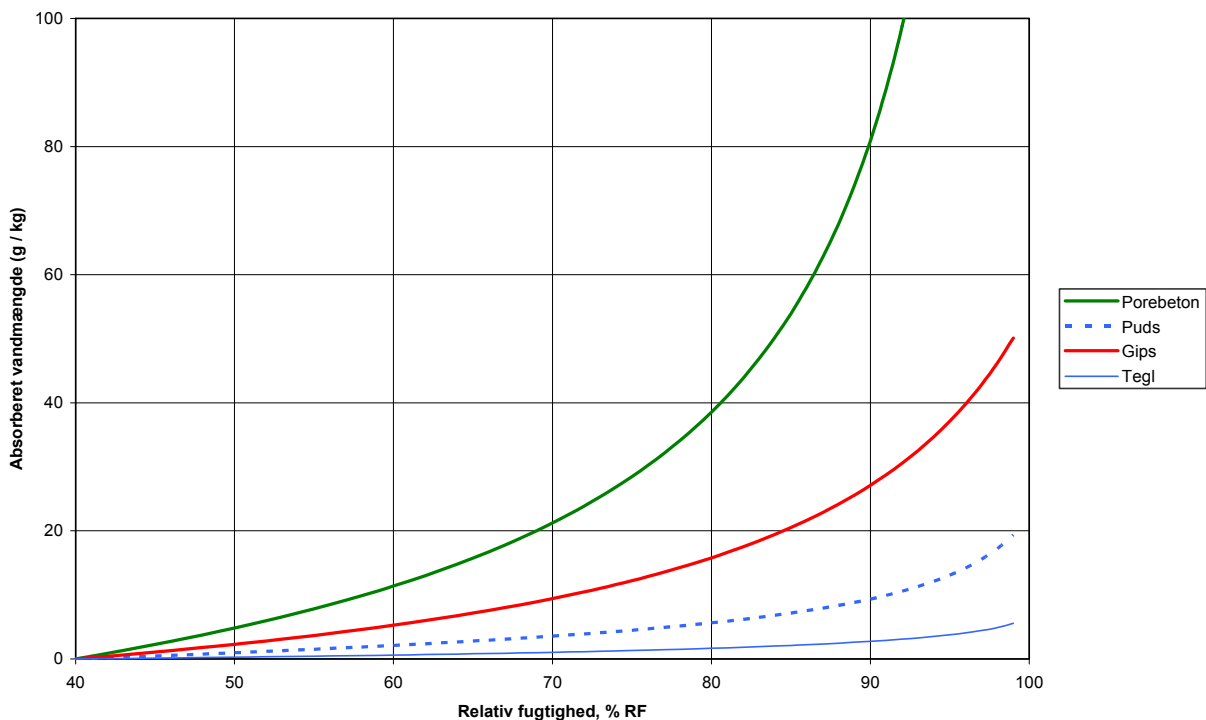
Målingerne i det murede hus blev foretaget den 22. maj, mens målingerne i det fuldmurede hus samt i træhuset blev foretaget henholdsvis den 16. og den 8. marts. Som nævnt i metodeafsnittet giver det forskellige klimapåvirkninger under målingerne, da det højere fugtniveau i udeluften giver mindre autoritet til interventionen, hvor der blev afdampet vand. Derved bliver resultaterne herfra ikke så markante.

Feltforsøgets resultater viser dog tydeligt den kalkpudsede teglkonstruktion og til dels også tegl/letbetonkonstruktionens evne til hurtigt at optage fugt og dermed til en vis grad udjævne indeluftens fugtindhold. Dette understreges af beregningerne for estimeret fugtoptag pr. vægareal i målerummet henholdsvis 4 og 8 timer efter afdampningens start (se Tabel 4). I begge tilfælde, samt når der udelukkende ses på estimeret fugtoptag, har træhuset det laveste fugtoptag af de tre konstruktioner.

Beregningen efter 4 timer vurderes her til at have størst relevans grundet interessen i den kortsigtede fugtbufferkapacitet. Efter 4, 8 eller flere timer vil fugtabsorptionens betydning gradvist aftage, da en stadigt større vandmængde vil være bortledt via ventilation. Samtidig vil der i en normal bolig efter 4 og især efter 8 timer kunne forventes yderligere fugtudledninger, hvorefter processen for henholdsvis absorption og desorption gentager sig. De gennem feltforsøget opnåede resultater for de tre vægkonstruktioner viser desuden, at de små forskelle vedrørende vandoptag og vanddiffusion, der påvises for stationære forhold beskrevet i projektets fase et (Muret byggeri og indeklima – Resultater fra et pilotprojekt) får større betydning under

transiente forhold. Men at konstruktionernes betydning primært er tydelig for beton/tegl-konstruktionen samt den i dag usædvanlige vægopbygning med indvendigt kalkpuds på tegl uden yderligere malerbehandling. Det må desuden stadig slås fast, at fugtabsorption i vægge er lille sammenlignet med den mængde vand, der afledes via ventilation.

Væg- og loftmaterialer samt eventuel møblering må formodes at have betydning for målerummenes samlede fugtbufferkapacitet. Det vil kræve yderligere forsøg at klarlægge betydningen af gulv, loft og eventuel møblering for målerummets samlede fugtbufferkapacitet og dermed vægmaterialernes signifikans.



Figur 15 Absorptionskurver for porebeton, puds, gips og tegl på baggrund af formler opstillet af Kielsgaard (1986). Kurverne er optegnet for stationære forhold i fugtintervallet 40-100 % RF, så de alle går gennem punktet 0 g/kg og 40 % RF. Dette er foretaget for at fokusere på ændringerne i vandindhold i det relevante fugtinterval.

Figur 15 viser vandabsorptionen under stationære forhold i forhold til absorptionen ved 40 % RF. På vægtbasis ses det, at der sker de største ændringer i vandindholdet for porebeton efterfulgt af gips og puds, mens tegl har de mindste ændringer af vandindholdet. De pudsede teglvægges absorptionspotentiale under ligevægtsforhold er således noget under de øvrige materials potentiale. Det skal dog her fremhæves, at kurverne er optegnet på vægtbasis, og at særligt gipsvægge normalt vil have en betydeligt mindre vægt per areal end de pudsede vægge.

Konstruktionens større fugtudjævning i praksis i de allerførste timer efter af-dampningen af vandet er således snarere et resultat af denne konstruktions mindre diffusionsmodstand. Fugttransporten går hurtigere i de mere åbne konstruktioner, og dermed er vandabsorptionen stor i de første timer efter fugtproducerende hændelser i forbindelse med bygningers almindelige brug.

Simuleringer i BSim

Det er muligt ved brug af programmet BSim teoretisk at studere udjævnin-gen af de indvendige fugtniveauer i forbindelse med forskellige spring i fugt-niveau. Men fastsættelsen af værdier for vægkonstruktionernes samlede dif-

fusionsmodstand og adsorptionsevne kan dog kun ske med betydelig usikkerhed, hvilket dog i denne sammenhæng er et grundvilkår.

Muligheden for at simulere de målte fugtforløb har ikke i alle tilfælde været lige overbevisende. Uoverensstemmelser mellem målinger og simuleringer er her mere markante, når fugttilførsel og fugtniveauets henfald opgøres i relativ fugtighed, mens det i lidt mindre grad er tilfældet, når resultaterne opgøres som vanddampkoncentration. Dette kan tilskrives, at selv små variationer i lufttemperaturen kan betyde ganske markante udsving i relativ fugtighed.

Uoverensstemmelserne mellem simuleringer og målinger må også i nogen grad tilskrives, at grundlaget for simuleringerne med hensyn til antagelse om døgnvariation i bygningerne anvendelse ikke helt stemmer overens med den faktiske anvendelse, herunder beboeraktiviteter med tilhørende påvirkninger af fugtkilder og luftskifte. Samtidig giver den tidlige opløsning på 1 time begrænset præcision ved pludselige fugttilførsel til indeluften.

Forskelle i niveauer og udsving i relativ fugtighed mellem målinger og simuleringer kan samtidig skyldes husenes forskellige udformning, hvilket har betydningen for husenes termiske indeklima. Udsving i temperatur kan her primært tilskrives forskelle i gulvkonstruktioner, hvor et "tungere/ tungt" gulv af marmorfliser ovenpå et lag af beton (i det fuldmurede hus) har en bedre evne til at udjævne indendørs temperaturer end et "lettere/ let" parketgulv på isolering (træhuset). Endvidere har vinduernes størrelse og placering betydning, hvilket der dog er taget højde for i simuleringerne med fælles geometri.

Ved at sammenligne resultater fra den faktiske geometri og placering af husene med resultaterne fra den fælles placering og geometri ses det, at forskellene mellem husene bliver mindre. Geometri og placering for de aktuelle huse har således markant betydning for temperaturforhold, der indvirker på fugtforholdene.

Det vurderes, at forskellen i materialernes evne til at moderere temperaturudsving i husene har signifikant betydning for det fugtmæssige indeklima. Simuleringerne af de hygrotermiske forhold i de tre bygninger viser, at konstruktionernes evne til at optage og efterfølgende afgive varme til indeluften og dermed sikre en mere stabil temperatur har afgørende betydning for indeluftens relative luftfugtighed og dermed for vækstforhold for skimmelsvampe, da temperatursvingningerne i perioder øger den relative fugtighed.

Denne egenskab til at regulere de termiske forhold har en indflydelse på (1) behovet for udluftning for at holde en behagelig indetemperatur, og (2) fastsættelsen af den relative fugtighed. Resultaterne indikerer, at det er disse to forhold, der er de mest afgørende for, hvordan byggematerialerne påvirker de fugtmæssige indeklimaparametre, hvorfor temperaturstabilitet her er en kvalitet i sig selv.

Yderligere viser simuleringerne, at overfladebehandlingen kun i mindre grad influerer på materialernes absorbering af vanddamp og dermed på hvilke variationer man ser i indendørs relativ fugtighed.



Konklusion

- Det fuldmurede hus har de mest konstante indetemperaturer efterfulgt af det moderne murede hus og træhuset.
- Set over en længere periode vil ventilationsforhold og beboeradfærd, herunder udluftning og håndtering af fugtkilder være mere afgørende for fugtigheden i indeluften end væggenes opbygning og materialesammensætning.
- Absorptionshastigheden er højere de første 4 timer efter pludselig fugttilførsel til indeluften i det fuldmurede hus efterfulgt af henholdsvis det murede hus og træhuset. Absorptionskapaciteten er dog størst i det murede hus efterfulgt af det fuldmurede hus, og træhuset med mindst kapacitet. Derfor er det samlede fugtoptag størst i det murede efter 8 timer efterfulgt af det fuldmurede hus og træhuset.
- Simuleringer i BSim har vist, at overfladebehandlingen ikke i nævneværdig grad influerer på materialernes absorption af vanddamp.



Referencer

Dührkop, Henry et al., (1981): SBI-anvisning 64 – Mørtel, muring, pudning – Teknologisk håndbog (2. reviderede udgave), Statens Byggeforskningsinstitut.

Gottfredsen, Finn R. og Nielsen, Anders (red), (1997): Bygningsmaterialer – Grundlæggende egenskaber, Polyteknisk Forlag.

Hansen, Kurt Kielsgaard, (1986): Sorption Isotherms – A Catalogue, Danmarks Tekniske Universitet.

Valbjørn, Ole et al. (red), (2000): SBI-anvisning 196 – Indeklimahåndbogen (2. udgave), Statens Byggeforskningsinstitut.



Bilagsoversigt

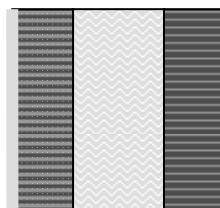
Bilag 1	Bygningsbeskrivelser
Bilag 2	Udregninger for model
Bilag 3	BSim simulering af hygrotermiske forhold i tre huse

Bilag 1

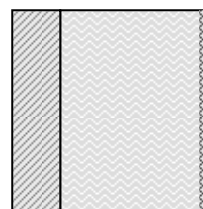
Bygningsbeskrivelser



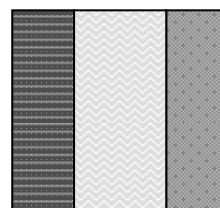
Fuldmuret hus med indfarvet kalkpuds, beliggende i Rødvig, 137 m².



Træhus med akrylmaledede gipsplader (sommerhus), beliggende i Hørsholm, 105,6 m².



Muret hus med akrylmalet letbeton, beliggende i Hørsholm, 142 m².



Fuldmuret hus

Bygningsbeskrivelse for det fuldmurede hus i Rødvig

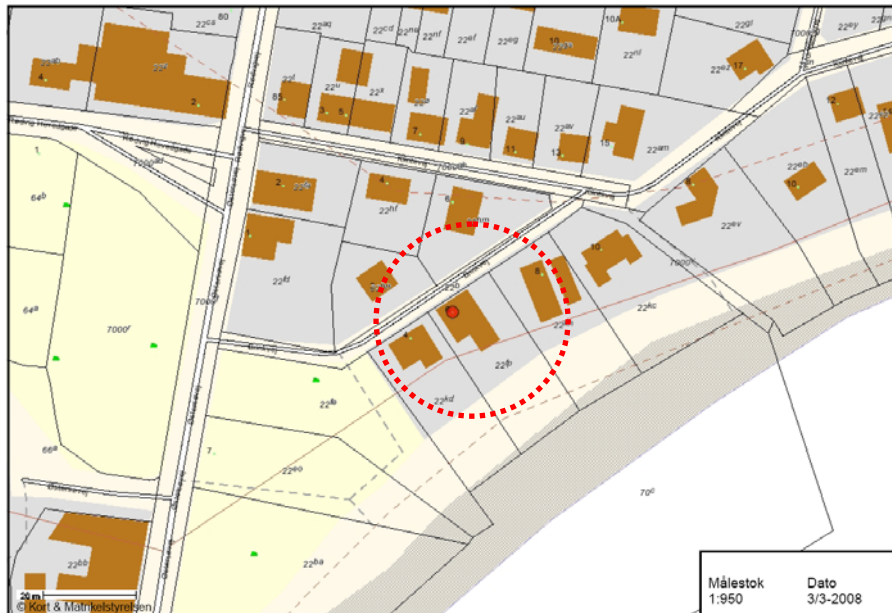
Måledato: 16. marts 2006
Beboelsesareal: 137 m²
Vandkogning: 1368 gram (start 13:15 – stop 13:30)

Indvendige mål for målerummet:

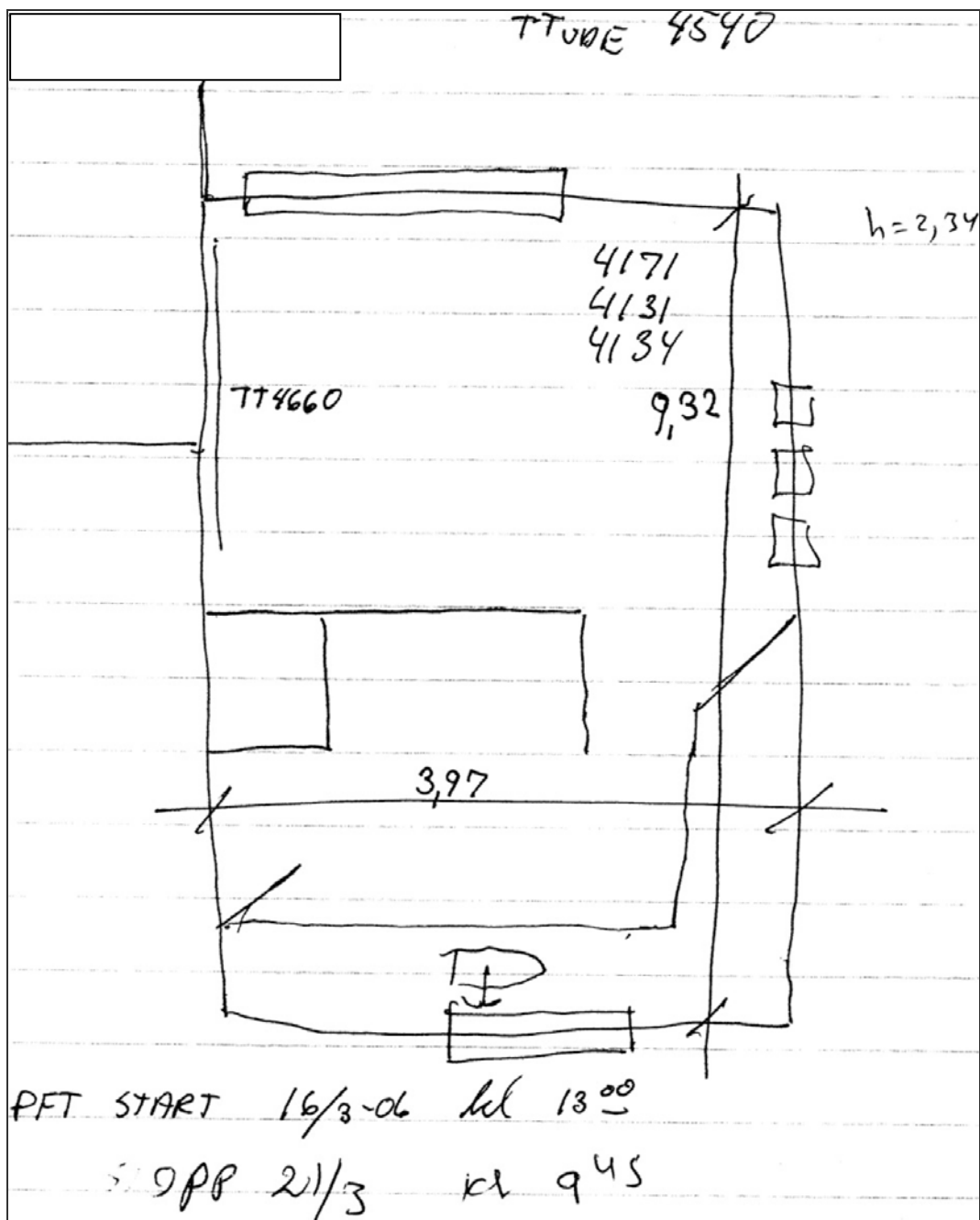
Vægareal, opmålt: 48,4 m²
Gulvareal, opmålt: 334 m²
Loftareal, opmålt: 38,6 m²

Antal personer i boligen: en voksen (soveværelset var udenfor mætningszonen)

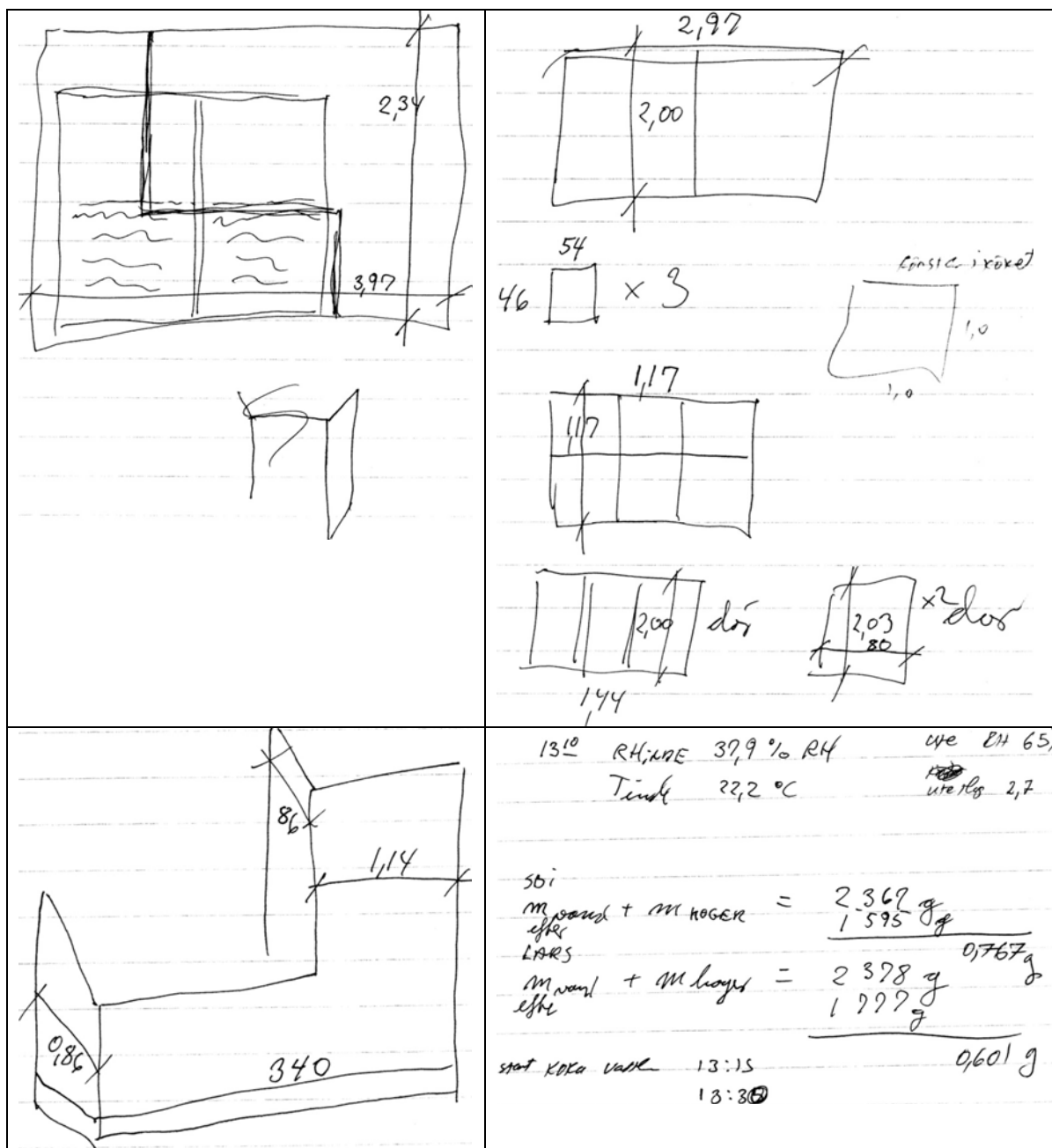
Det fuldmurede hus vurderes på baggrund af redegørelsen at have en klima-skærm, der indefra består af indfarvet kalkpuds på hultegl efterfulgt af mineraluld, massiv tegl og yderst indfarvet kalkpuds. Loftet i målerummet består af kalkpuds på grantræ efterfulgt af dampspærre på mineraluld. Gulvet består af marmorfliser udlagt på beton efterfulgt af EPS-isolering og kapillar-brydende stenlag.
Differencen mellem gulv- og loftareal skyldes målerummets møblering (her primært køkkenelementer).



Figur 1 Husets beliggenhed i Rødvig trukket på den Offentlige Informationsserver, www.ois.dk



Figur 2 Plantegning af rummet i det fuldmurede hus i Rødvig, hvori der er foregået målinger 16. marts 2006.



Figur 3 Redegørelse for dimensioner og placering af vinduer og inventar samt fugtpåvirkning under måling i det fuldmurede hus i Rødvig, 16. marts 2006.

Træhus

Bygningsbeskrivelse af træhuset i Hørsholm

Sommerhus

Måledato: 8. marts 2006
Beboelsesareal: 106 m²
Vandkogning: 1023 gram (start 15:40 – stop 15:55)

Indvendige mål for målerummet:

Vægareal, opmålt: 45,2 m²
Gulvareal (parket), opmålt: 39,1 m²
Loftareal (træ), opmålt: 44,7 m²

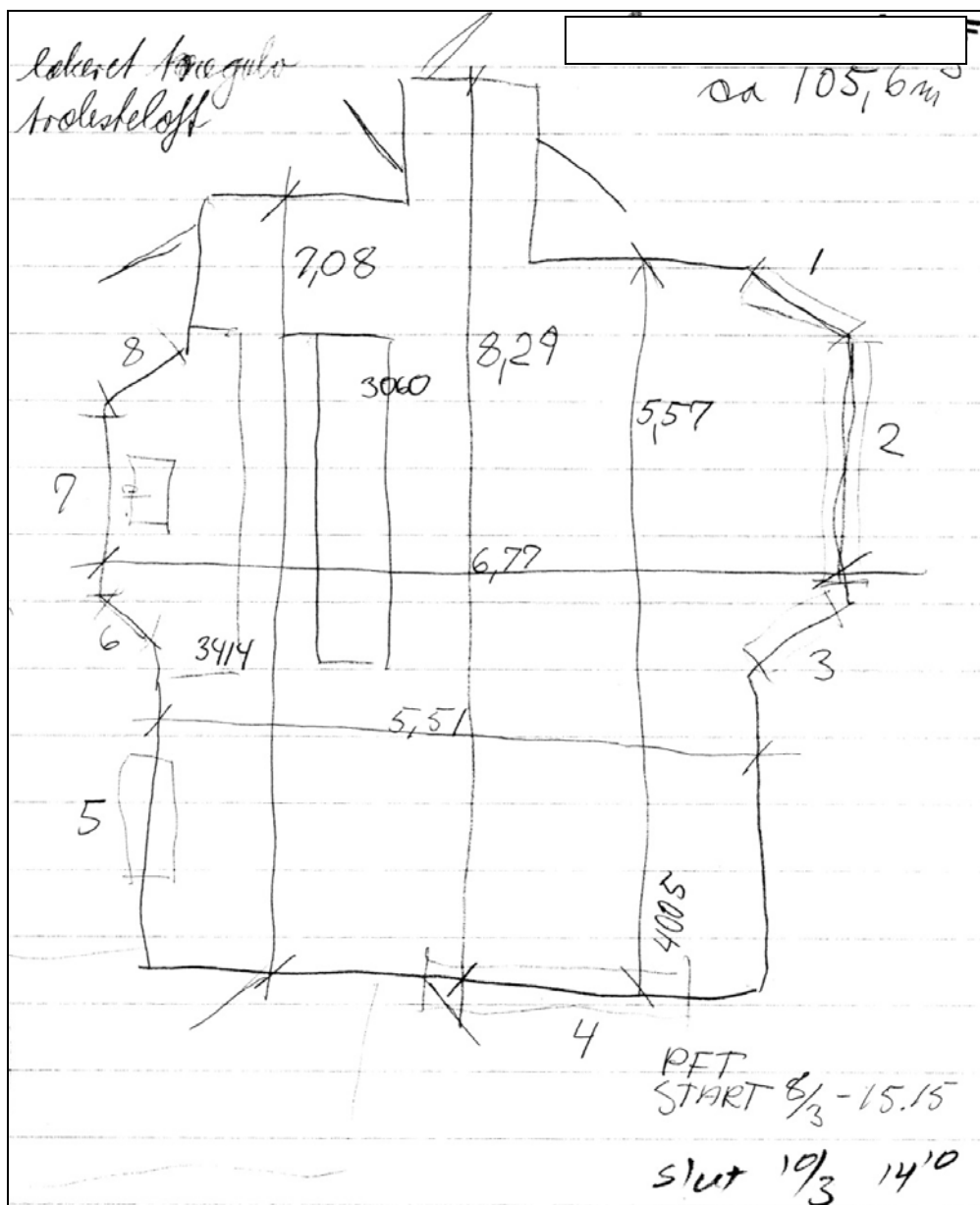
Antal personer i boligen: to voksne og et nyfødt barn (soveværelset var udenfor mætningszonen)

Træhuset vurderes på baggrund af redegørelsen at have en klimaskærm, der indefra består af gipsplader på dampspærre efterfulgt af mineraluld og en udvendig træbeklædning af gran. Loftet i målerummet består af listeloft af ubehandlet grantræ på dampspærre og mineraluld. Gulvet er bølgeparket på mineraluld efterfulgt af et klaplag af beton på polystyren og kapillarbrydende stenlag.

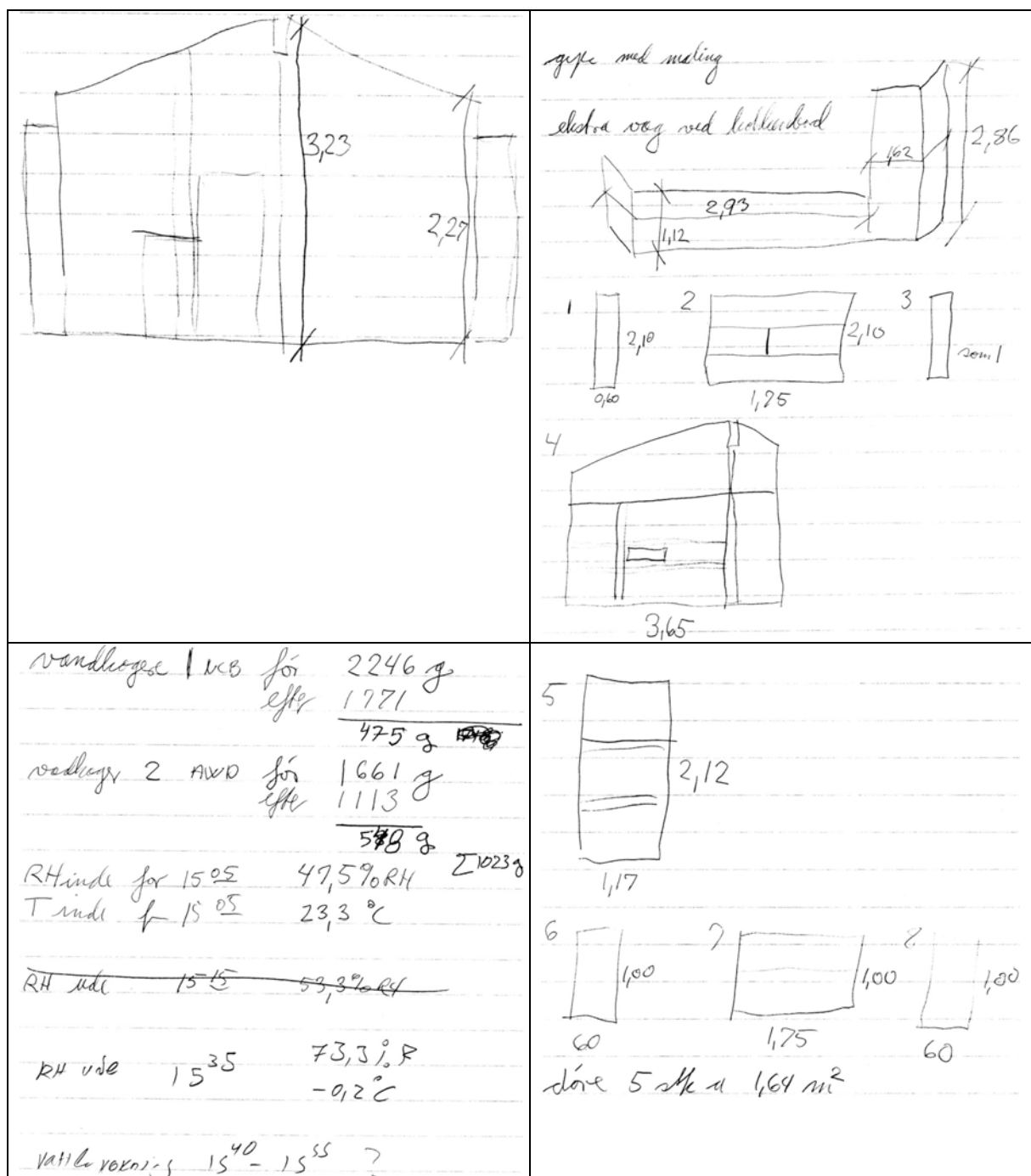
Differencen mellem gulv- og loftareal skyldes loftets hældning samt målerummets møblering.



Figur 4 Husets beliggenhed i Hørsholm trukket på den Offentlige Informationsserver, www.ois.dk



Figur 5 Plantegning af træhuset i Hørsholm, hvori der er foregået målinger 8. marts 2006.



Figur 6 Redegørelse for dimensioner og placering af vinduer og inventar samt fugtpåvirkning under måling i træhuset i Hørsholm, 8. marts 2006.

Muret hus

Bygningsbeskrivelse af det murede hus i Hørsholm

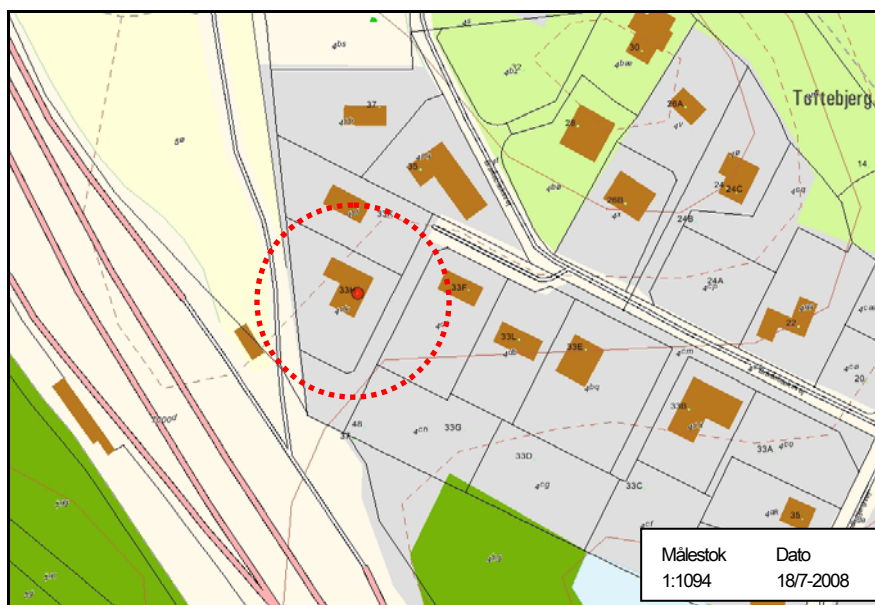
Måledato: 22. maj 2006
Beboelsesareal: 142 m²
Vandkogning: 1602 gram (start 16:14 – stop 16:30)

Indvendige mål for målerummet:

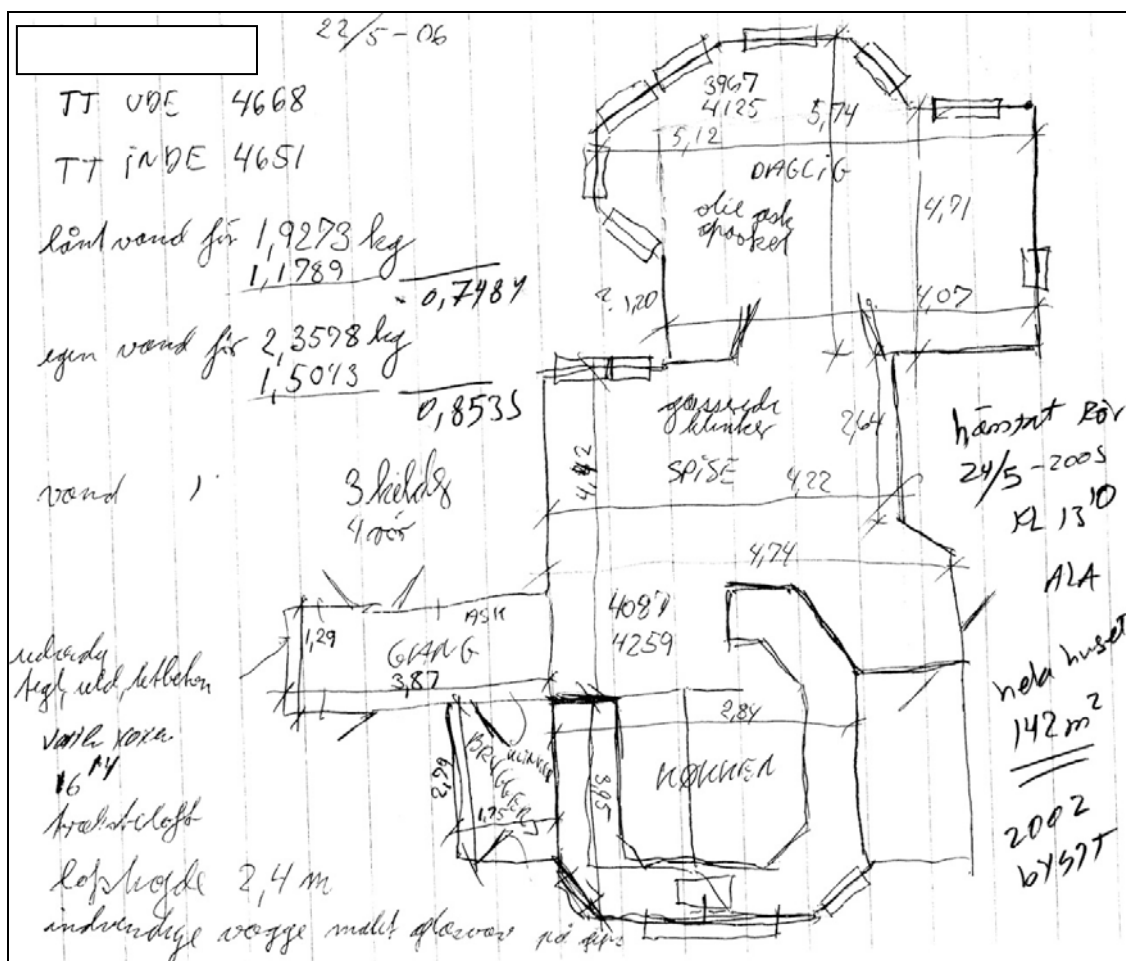
Vægareal: 95,5 m²
Gulvareal, parketgulv: 59,2 m²
Loftareal, træ: 66,6 m²

Antal personer i boligen: to voksne og et nyfødt barn (soveværelses var udenfor mætningszonen)

Det murede hus vurderes på baggrund af redegørelsen at have en klimaskærm, der indefra består af letbeton, mineraluld og massiv tegl. Loftet i målerummet består af listeloft af ubehandlet grantræ på dampspærre og mineraluld. Gulvet består af lakeret bøgemarket på mineraluld efterfulgt af et klaplag af beton på polystyren og kapillarbrydende stenlag. Differencen mellem gulv- og loftareal skyldes målerummets møblering.



Figur 7 Beliggenhed for det murede hus i Hørsholm trukket på den Offentlige Informationsserver, www.ois.dk



Figur 8 Redegørelse for udformning og geometri af de rum i det murede hus i Hørsholm, hvori målinger har fundet sted 22. maj 2006.

Bilag 2

Afdelingen for Sundhed og
Komfort
Ásta Logadóttir

04. dec. 2007
Journal nr. 751-028

Udregninger for model

Masseformelen for et rum med overflader uden absorption og tilskud af vanddamp er følgende:

$$\frac{dv_i}{dt} = n \cdot v_e + \frac{G_p}{V} - n \cdot v_i$$

Hvor

v_i er dampkoncentration indendørs [g/m^3]

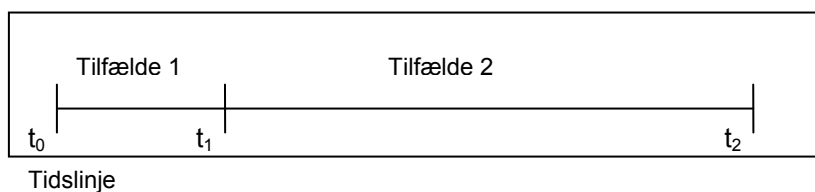
v_e er dampkoncentration udendørs [g/m^3]

n er antal luftskifter [h^{-1}]

G_p er tillægsgugtproduktion [g/h]

V er rumvolumen [m^3]

Modellen er opdelt i to tilfælde, se tidslinje.



Tilfælde 1 gælder hvor tillægsgugtproduktion er i form af vandkogning og almindelig husstandsugtproduktion. $G = G_{\text{vand_kogning}} + G_{\text{alm}}$

Tilfælde 2 gælder hvor tillægsgugtproduktion er i form af almindelig husstandsugtproduktion, altså uden vandkogning. $G = G_{\text{alm}}$

Differentialligningen løses for begge tilfælde ved Laplace transformation.

Tilfælde 1

I tilfælde 1 begynder vandkogning ved tiden $t_0=0$ og stopper ved tiden t_1 .

$$L\left\{\frac{dv_i(t)}{dt} = n \cdot v_e(t) + \frac{G_p}{V} - n \cdot v_i(t)\right\}$$

\Downarrow

$$sV_i(s) - v_i(0) = n \cdot \frac{v_e(s)}{s} + \frac{G_p(s)}{V} - n \cdot V_i(s)$$

$$G_p(s) = \frac{G}{s}, \text{ hvor } G = G_{\text{vand_kogning}} + G_{\text{alm}}$$

Laplace ligningen er efterfølgende:

$$V_i(s) = \frac{v_i(0)}{s+n} + \frac{n \cdot v_e(s)}{s(s+n)} + \frac{G}{V \cdot s(s+n)}$$

$$V_i(s) = \frac{v_i(0)}{s+n} + \frac{v_e(s)}{s} - \frac{v_e(s)}{(s+n)} + \frac{G/Vn}{s} - \frac{G/Vn}{(s+n)}$$

invers Laplace transform er

$$L^{-1}\{V_i(s)\} \rightarrow v_i(t) = v_i(0) \cdot e^{-nt} + v_e(t) - v_e(t) \cdot e^{-nt} + \frac{G}{Vn} - \frac{G}{Vn} \cdot e^{-nt}$$

Dampkoncentrationen indendørs for tilfælde 1 er:

$$v_i(t) = v_i(0) \cdot e^{-nt} + v_e(t)(1 - e^{-nt}) + \frac{G}{Vn}(1 - e^{-nt})$$

Tilfælde 2

Tilfælde 2 begynder når vandkogning er stoppet ved tiden t_1 og indtil målinger slutter ved tiden t_2 . Tillægs fugtproduktion er $G = G_{\text{alm}}$

$v_i(t_1)$ er en konstant

$$L\left\{\frac{dv_i(t)}{dt} = n \cdot v_e(t) + \frac{G_p}{V} - n \cdot v_i(t)\right\}$$

\Downarrow

$$sV_i(s) - v_i(0) = n \cdot \frac{v_e(s)}{s} + \frac{G_p(s)}{V} - n \cdot V_i(s)$$

$$G_p(s) = \frac{G}{s}, \text{ hvor } G = G_{\text{alm}}$$

Laplace ligningen er efterfølgende, som vist i tilfælde 1:

$$V_i(s) = \frac{v_i(0)}{s+n} + \frac{v_e(s)}{s} - \frac{v_e(s)}{(s+n)} + \frac{G/Vn}{s} - \frac{G/Vn}{(s+n)}$$

Invers Laplace transform er

$$L^{-1}\{V_i(s)\} \rightarrow v_i(t) = v_i(t_1) \cdot e^{-nt} + v_e(t) - v_e(t) \cdot e^{-nt} + \frac{G}{Vn} - \frac{G}{Vn} \cdot e^{-nt}$$

Dampkoncentrationen indendørs for tilfælde 2 er:

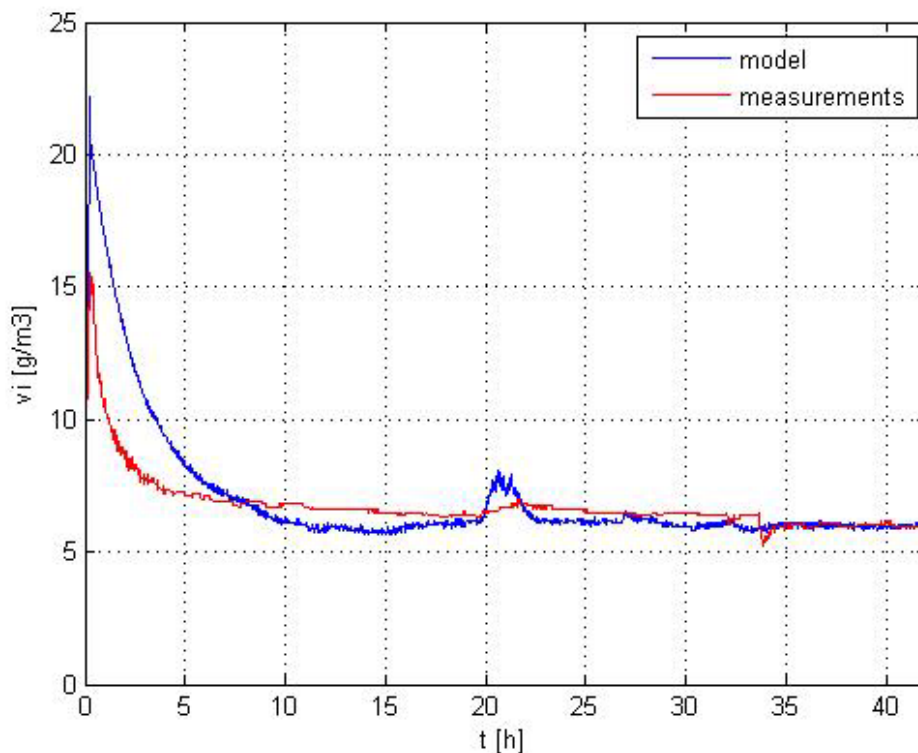
$$v_i(t) = v_e(t) + (v_i(t_1) - v_e(t)) \cdot e^{-nt} + \frac{G}{Vn}(1 - e^{-nt})$$

Anvendte værdier for dampkoncentration fremgår af Tabel 2.

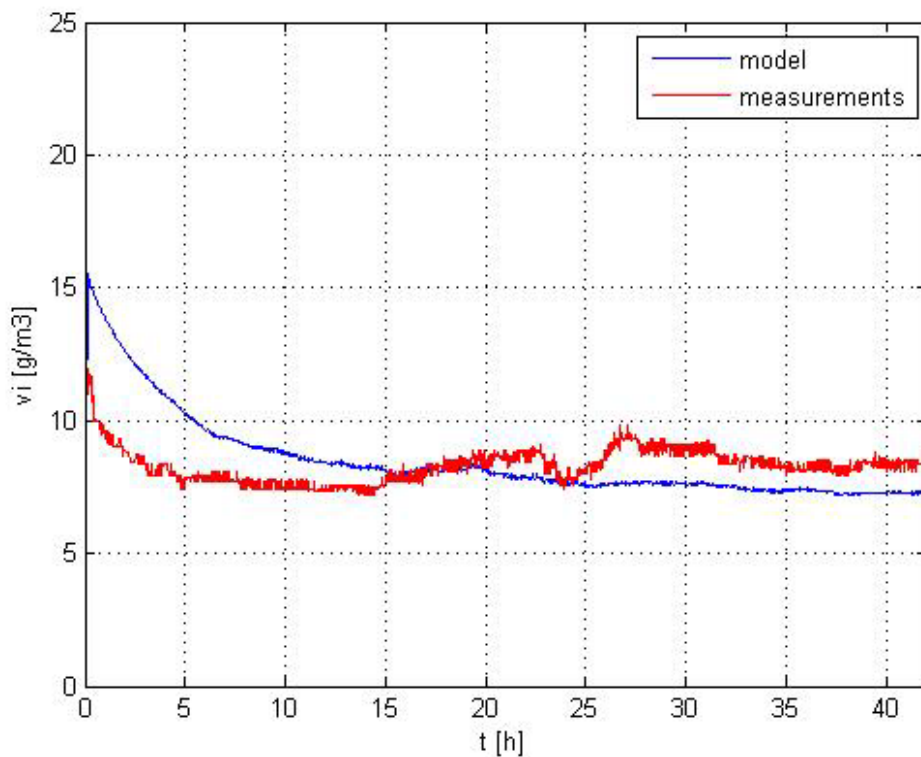
Tabel 1 Fugtbelastning i de tre huse

	Fuldmuret hus	Træhus	Muret hus
Fugt fra personer kg/døgn	0,67	1,67	1,67
Øvrig fugt kg/døgn	1,33	1,33	1,33
Samlet kg/døgn	2,0	3,0	3,0
Gennemsnitlig fugtbelastning g/h	85	125	125
Afkøgt vand kg	1,368	1,602	1,023

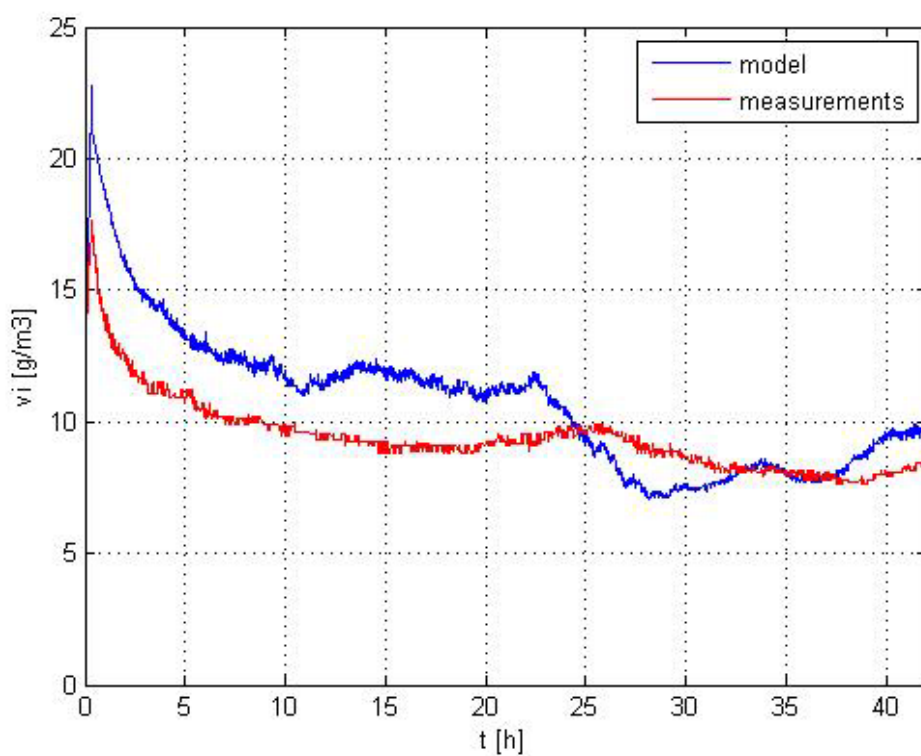
Figur 1-3 viser forløbet for model og målinger af den indendørs vanddampkoncentration i forbindelse med de punktvisse fugtudledninger for henholdsvis det fuldmurede hus, træhuset og det murede hus.



Figur 1 Fuldmuret hus; model og målinger

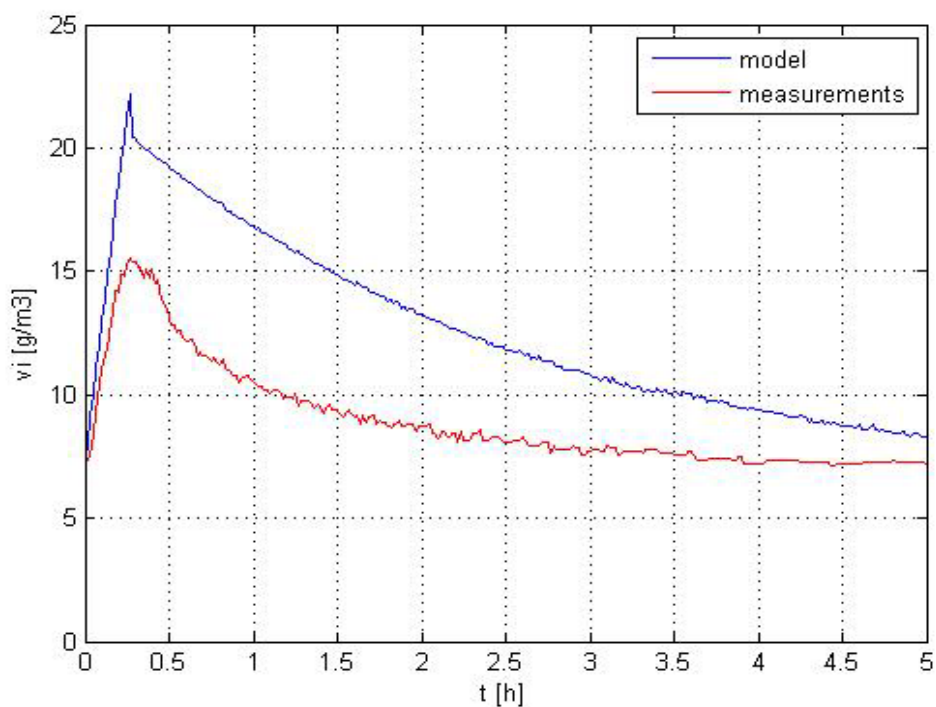


Figur 2 Træhus; model og målinger

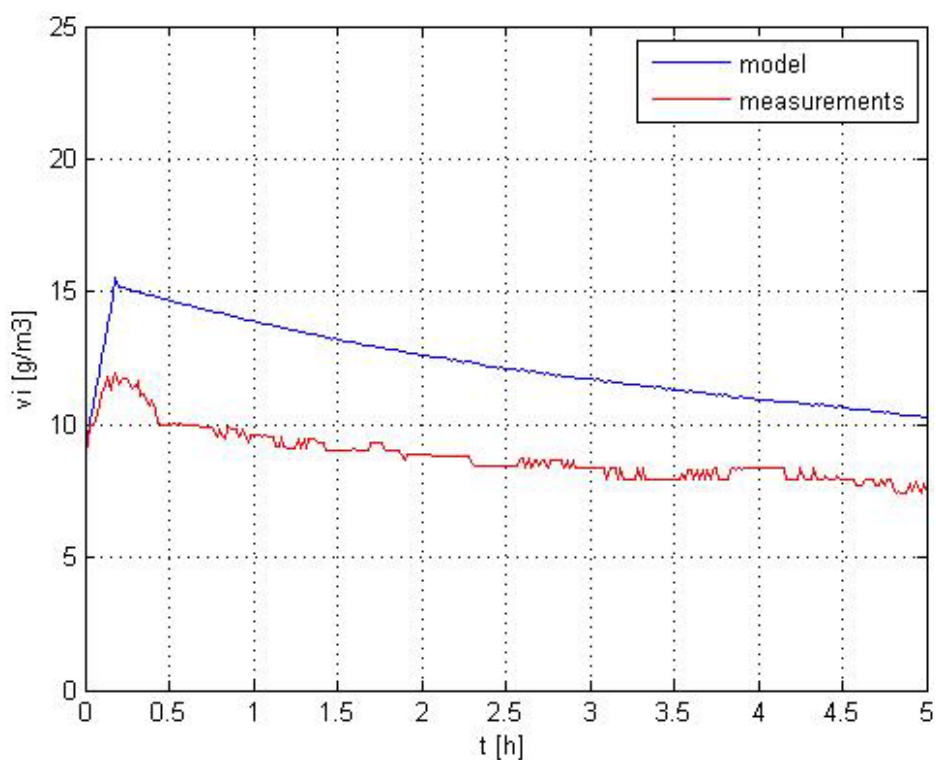


Figur 3 Muret hus; model og målinger

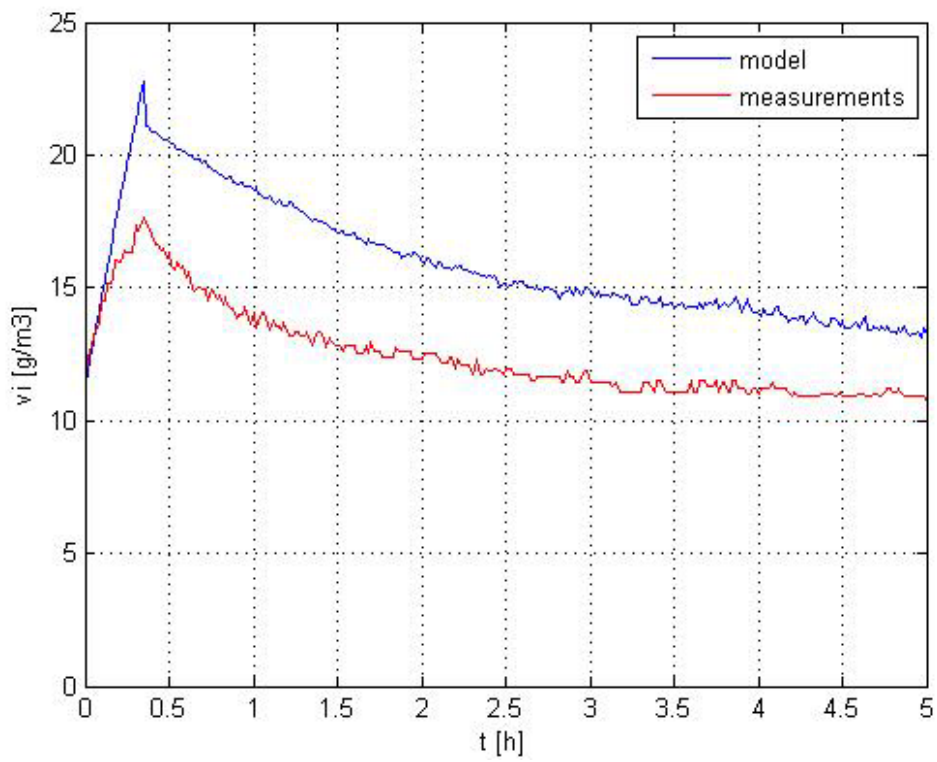
Figur 4-6 viser forløbet for den momentvise stigning i indendørs fugtighed de første 5 timer af måleperioden i de tre huse.



Figur 4 Fuldmuret hus; model og målinger – peak



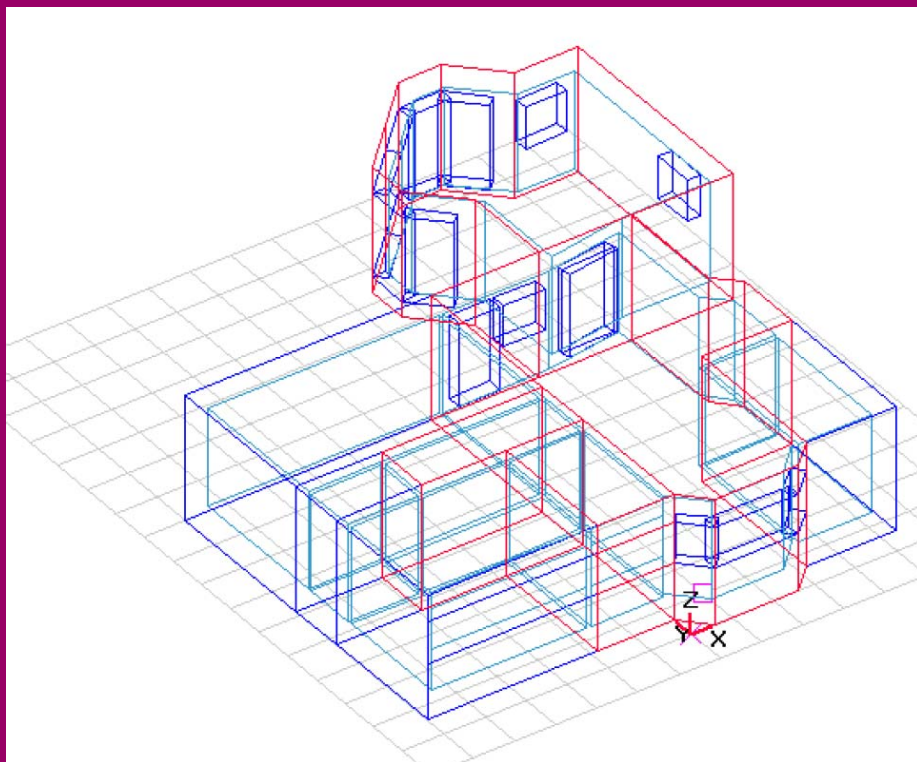
Figur 5 Træhus; model og målinger - peak



Figur 6 Muret hus; model og målinger - peak

Carsten Rode

BSim simulering af hygrotermiske forhold i tre huse



Rapport
DTU Byg
Byg SR-08-02
2008
ISSN 1601-8605

BSim simulering af hygrotermiske forhold i tre huse

Carsten Rode
DTU Byg
September 2008

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	3
2	Simulering af feltforsøg	5
2.1	Det fuldmurede hus.....	5
	Konstruktioner.....	5
	Termiske forhold	6
	Simuleringer.....	6
2.2	Træhuset	10
	Konstruktioner.....	10
	Termiske forhold	10
	Fugttilskud	10
	Simuleringer.....	10
2.3	Det murede hus	14
	Konstruktioner.....	14
	Termiske forhold	14
	Fugttilskud	14
	Simuleringer.....	15
3	Helårssimuleringer	19
3.1	Helårssimuleringer af det fuldmurede hus, træhuset og det murede hus.....	19
	Temperaturforløb	19
	Relativ fugtigheds-forløb	21
	Dampkoncentrationsforløb	24
3.2	Helårssimuleringer med konstruktioner af fuldmur, træ og kombinationsmur	26
	Temperaturforløb	27
	Relativ fugtigheds-forløb	29
	Dampkoncentrationsforløb	31
3.3	Helårssimuleringer uden overfladebehandling	33
	Relativ fugtigheds-forløb	33
	Dampkoncentrationsforløb	36
4	Afrunding	39

Nærværende arbejde er udført som led i projektet *Teglvægges fugtoptag og –afgivelse i forbindelse med pludselige ændringer af den indvendige fugtbelastning*, der er en videreførelse af projektet *Muret byggeri og indeklima*. DTU Byg har udført arbejdet under en samarbejdsaftale med Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet (SBI). Projektets opdragsgiver har været Kalk- og Teglværksforeningen af 1893.

Nærværende rapport er udarbejdet i tilknytning til SBI's rapportering af projektet: "Muret byggeri og indeklima - Teglægges fugtoptag og afgivelse ved pludselige ændringer af den indvendige fugtbelastning". SBI's rapport vil i nærværende rapport blive benævnt "hovedrapporten".

1 Indledning

Programmet BSim¹ er benyttet til simulering af de varme- og fugttekniske forhold i de tre huse:

- Et fuldmuret hus med indfarvet kalkpuds. Huset vil i kort form blot blive benævnt "Fuldmuret hus". Huset er på 137 m² og er beliggende i Rødvig
- Et træhus med akrylmaalede gipsplader (sommerhus). Huset vil i kort form blive benævnt "Træhus". Huset er på 105,6 m² og er beliggende i Hørsholm
- Et muret hus med akrylmalet letbeton. Huset vil i kort form blive benævnt "Muret hus". Huset er på 142 m², og er beliggende i Hørsholm

BSim programmet beregner de termiske forhold på timebasis under hensyntagen til de ude- og indeklimatiske påvirkninger. Temperaturer og varmebalancer bestemmes for termiske zoner i bygningerne, idet de termiske zoner kan bestå af et eller flere fysiske rum. Tilsvarende bestemmes temperaturer og varmestrømme gennem hver bygningsdel i husene. De udeklimatiske påvirkninger af betydning for de termiske beregninger er især temperaturer, solindfald og vindpåvirkning. Indendørs betragtes varmetilskud fra aktiviteter i husene, varmeanlæg med et setpunkt for opvarmning, soltilskud fra vinduer og glaspartier i klimaskærmen samt ventilation. I beregningerne tages der hensyn til, hvordan varme udveksles mellem rum og konstruktioner, så fx bygningsdelenes termiske masse betragtes.

BSim udfører tilsvarende beregninger af de fugtmæssige balancer for rum og bygningsdele. Fugtigheden i de indendørs rum afhænger af luftskiftet, den udendørs fugtighed og indendørs fugttilskud pga. aktiviteter i husene. Der beregnes fugttilstand i bygningsdelene samt fugtudveksling mellem disse og de indendørs rum, samt mellem konstruktionerne og udeklimaet.

Redegørelsen for bygningernes forhold fremgår af:

- En summarisk redegørelse for husenes arealer og materialemæssige forhold
- En skitsetegning af de rum, hvori der for hvert hus en dag i foråret 2006 er udført målinger

Dette materiale fremgår som bilag 1 til hovedrapporten.

I forhold til redegørelsen for bygningernes udformning bemærkes følgende af relevans for beregningerne:

- Bygningernes orientering på grunden er skønnet ud fra kort trukket fra den Offentlige Informationsserver, www.ois.dk. Der er desuden aflagt et besøg ved husene i Hørsholm.
- Til beregningerne er væggene i det murede hus tolket som værende opbygget af letbeton, mineraluld og tegl.

Under besøgene har det til dels været muligt at få et indblik i bygningernes orientering og evt. skyggegivende forhold, som fx tagudhæng.

Forsøgene og bygningsbeskrivelsen har i visse tilfælde kun omfattet visse af bygningens rum, hvorfor der til simuleringerne er gjort fornødne simple antagelser om resten af husenes rum og udformning.

¹ Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. Building Simulation. www.bsim.dk. 2008. Der er benyttet BSim Version 6, 7, 6, 26, dateret 30-07-2007.

Der er gennemført fire sæt simuleringer:

1. Simuleringer, der så vidt muligt søger at gengive forholdene, de enkeltdage i foråret 2006, hvor der har været målinger af fugttilstand og luftskifte medens og efter, der i intense forløb blev fordampet vand i husene. Til disse simuleringer er benyttet vejrdata fra en målestation på DTU for de aktuelle måleperioder.
2. Helårssimuleringer med referenceårsdata med udgangspunkt i en formodet belastning fra brugen af husene.
3. Helårssimuleringer af geometrien og beliggenheden af huset i Rødvig, idet der som konstruktioner på skift regnes med de fuldmurede konstruktioner; trækonstruktioner; eller murede kombinationsvægge, der forefindes i de studerede huse.
4. Helårssimuleringer af geometrien og beliggenheden af det fuldmurede hus, hvor der som vægge på skift er anvendt fuldmurs-, træ- og kombinationskonstruktioner uden overfladebehandling (de fuldmurede vægge dog stadig med kalkpuds).

2 Simulering af feltforsøg

Dette sæt simuleringer søger at efterligne målingerne foretaget i de enkelte bygninger på følgende enkeltdage:

- Fuldmuret hus. I denne bygning er der den 16. marts 2006 i tidsrummet 13:15 til 13:30 tilført vanddamp til indeluften ved afdampning af 1368 gram vand.
- Træhus. I denne bygning er der den 8. marts 2006 i tidsrummet 15:40 til 15:55 tilført vanddamp til indeluften ved afdampning af 1023 gram vand.
- Muret hus. I denne bygning er der den 22. maj 2006 i tidsrummet 16:14 til 16:29 tilført vanddamp til indeluften ved afdampning af 1602 gram vand.

Udeklimaet er ikke løbende blevet målt på de respektive lokaliteter efter de første par dage. Det har derfor været forsøgt at få vejrdata fra DMI, men dette blev fravalgt, da DMI nok kunne levere data fra nogenlunde nærliggende målestationer, men ingen af disse indeholdt solstrålingsdata. Solstråling og skyggeforhold betragtes som vigtige parametre for simuleringerne, idet disse forhold i høj grad betinger de termiske forhold i bygningernes rum.

Da der viste sig mulighed for at få vejrdata med solstråling fra en målestation på DTU i Kgs. Lyngby ca. 10 km syd for hørsholmhusene, blev det valgt at benytte disse. Målingerne fra DTU indeholder til gengæld ikke registreringer af de udendørs fugtforhold. Det er valgt at sætte den til en hver tid værende dugpunktstemperatur lig med den koldeste temperatur den foregående nat – dette vil i almindelighed give en god tilnærmelse til de udendørs fugtforhold.

I de tre perioder, der har fundet målinger sted i husene, har der af SBI været målt udendørs temperatur og relative fugtighed – typisk i forløb af få dages varighed. For disse perioder, er de af SBI målte data blevet omsat til timemiddelværdier og anvendt i stedet for DTU-oplysningerne.

2.1 Det fuldmurede hus

Figur 1 viser BSim modellen af huset i Rødvig, og Tabel 2 viser en summarisk dokumentation af modellen. Forsøgene, og derfor også modellen, omfattede kun et køkken/alrum i boligen.

Konstruktioner

Indefra regnet er vægkonstruktionerne modelleret som 15 mm kalkpuds, 108 mm hultegl med densitet 1200 kg/m^3 , 125 mineraluld, og 108 mm (beregningsmæssigt dog kun 93 mm) massiv tegl med densitet på 1850 kg/m^3 .

Der er indsat vinduer og døre som vist på Figur 1. Udvendige vinduer har "super-lavenergiruder" med center U-værdi på $1,1 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, og vinduerne er udført med 50 mm ramme/karm af træ.

Gulvet er regnet som 25 mm fliser af marmor udlagt på 100 mm beton, hvorunder der er 150 mm EPS isolering og 100 mm kapillarbrydende stenlag. Gulvet er regnet uden overfladebehandling.

Det vandrette loft består af 20 mm kalkpuds, derover 25 mm brædder af grantræ, en dampspærre med Z-værdi på $250 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$ og 200 mm mineraluldisolering. Den udvendige tagbeklædning er ikke beskrevet.

Termiske forhold

Rummet regnes med et opvarmningssystem med et setpunkt på 22,0°C, hvilket sammen med de periodiske stigninger i lufttemperaturen på grund af andre varmetilskud gør, at den beregnede gennemsnitstemperatur svarer til den målte i måleperioden (22,2°C). Der regnes med en konstant infiltration, der giver et luftskifte på 0,42 h⁻¹, sådan som det blev målt i huset, da forsøget fandt sted.

Fugttilskud

Rummet påregnes at have et normalt dagligt fugttilskud på 2 kg fordelt jævnt før Tabel 1.

Tabel 1 Fugttilskud for køkken/alrummet i det fuldmurede hus

Fugttilskud	kl. 6-7 kl. 17-19	kl. 15-17 kl. 19-23	Øvrige timer	Samlet fugttilskud
Fuldmuret hus	205 g/h	103 g/h	51 g/h	2000 g/døgn

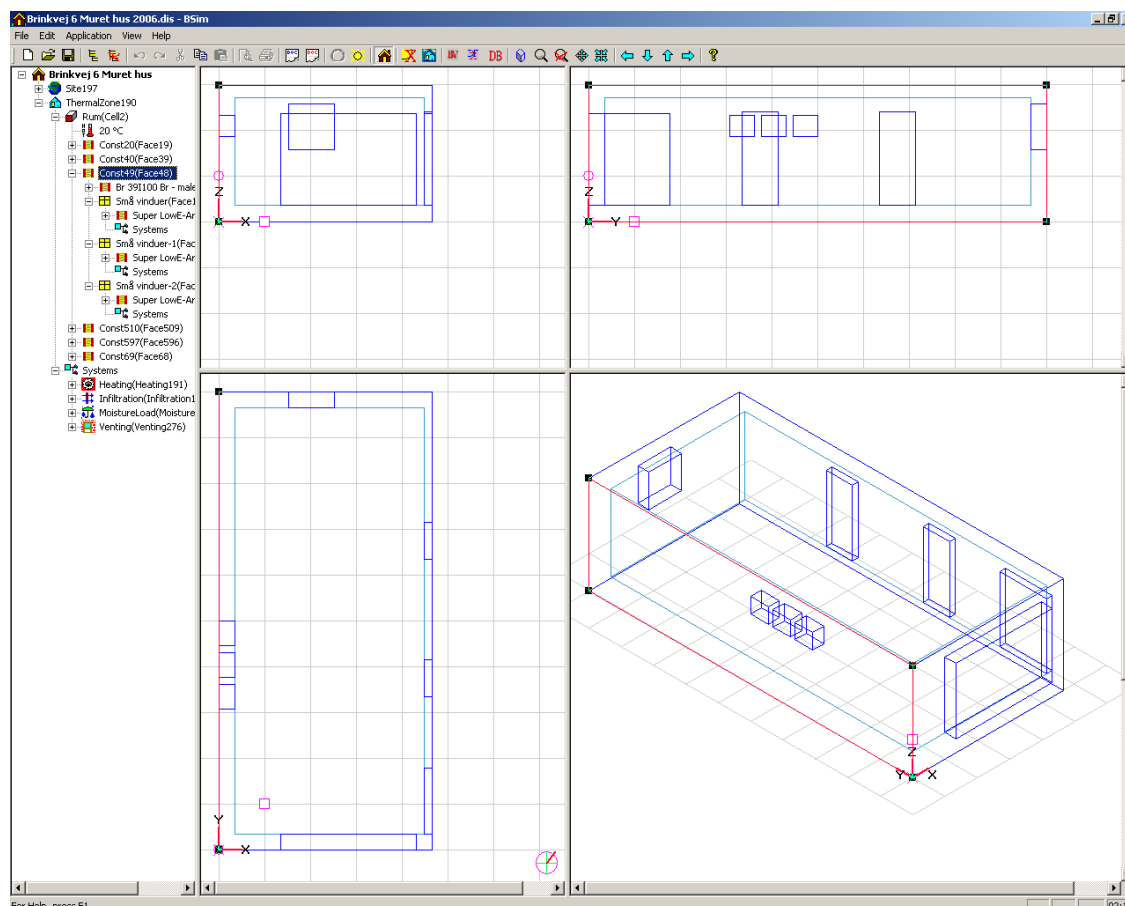
Den 16. marts kl. 13 -14 regnes med en fugtbelastning af en times varighed, der frigiver 1368 gram vanddamp som i eksperimentet. BSim kan ikke regne med fugtpåvirkninger af kortere varighed end 1 time, hvorfor lasten bliver mindre intens end i forsøget, hvor samme fugtmængde blev frigivet på 15 min.

BSim regner på de termiske forhold i bygningen. BSim kan desuden regne på fugtbalancen, idet programmet tager hensyn til fugtudveksling mellem bygningens konstruktioner og den indendørs luft, når det i øvrigt opregner balancen mellem den tilførte vanddamp og opblandingen med ventilationsluften udefra.

Simuleringer

Simuleringerne er kørt fra den 1. januar 2006. Der er benyttet følgende simuleringsparametre: "Optimized Simulation", "Moisture Transport", "Glazing Temperature", "Longwave Radiation to Sky", og "Latent Heat". Der er regnet med interne tidsstep på 1 min (60 step pr. time)², og en maksimal tykkelse af de kontrolvolumener, materialerne opdeles i, på 1 cm.

² I nogle af simuleringerne af dette og de andre huse, der vises i denne rapport, er det ikke altid lykkedes at få BSim til at regne med 60 tidsstep pr. time uden at programmet af numeriske årsager har ramt en singularitet, så beregningen har fejlet. I disse tilfælde er beregningerne gentaget ved successiv forøgelse af tidssteppene ved brug af 50, 40 eller 30 tidsstep pr. time indtil beregningen lykkes. Det vil ikke blive yderligere dokumenteret, i hvilke beregninger, sådanne hændelser er opstået, idet det ikke forventes at have influeret på de sluttelige resultater i nævneværdigt omfang.



Figur 1 BSim model af det fuldmurede hus i Rødvig. Modellen viser kun det rum, målingerne fandt sted i. Huset har tilstødende rum mod nordøst (se den lille røde nordpil på kompasset nederst til højre i plantegningen).

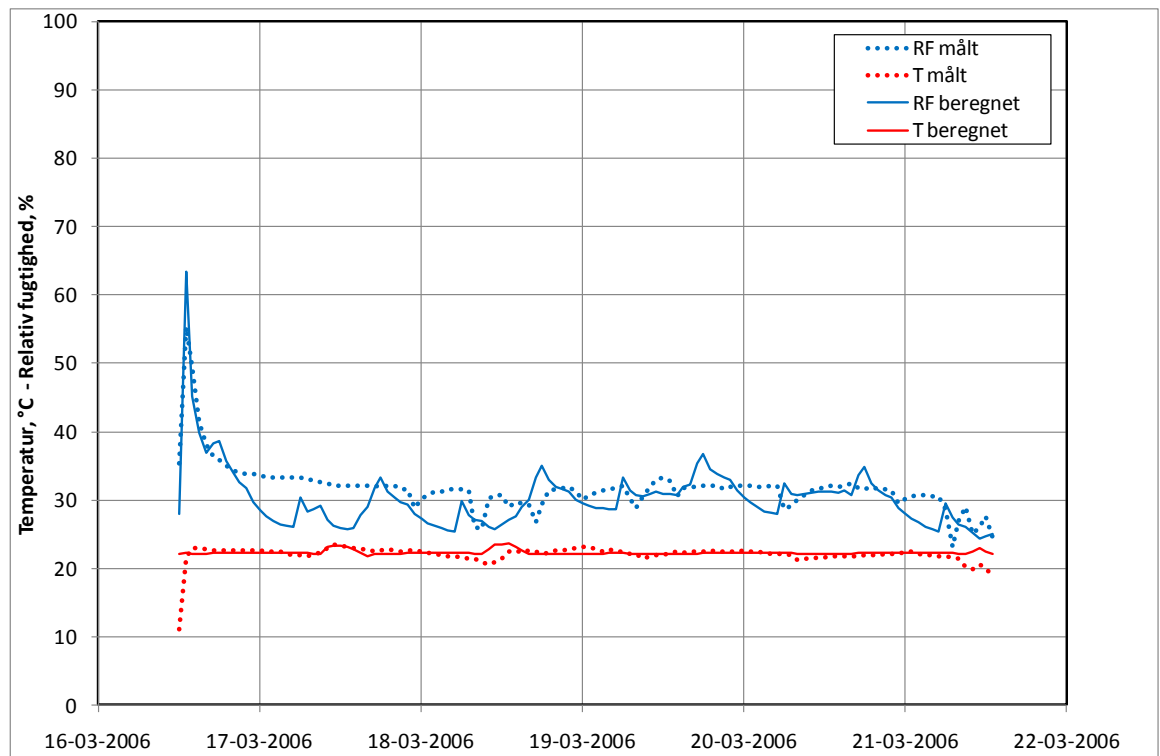
Figur 2 viser sammenligningen mellem de målte og beregnede forløb af temperatur og relative fugtighed i dagene efter fugttilførslen den 16. marts. I henhold til målingerne stiger den relative fugtighed med ca. 20 %-RF, medens stigningen i henhold til beregningerne er ca. 35 %-RF. Muligheden for at simulere det målte RF-forløb under den korte, intense påvirkning er altså ikke meget overbevisende.

Dette kan dog hænge sammen med, at selv små variationer i lufttemperaturen kan betyde ganske markante udsving i RF. Dette vil blive udlignet, hvis resultaterne vises som dampkoncentration, hvilket er gjort i Figur 3. I henhold til målingerne fås en tilvækst i vanddampkoncentration på ca. $7,0 \text{ g/m}^3$, når der afdampes vand under forsøget, og samme resultat, $7,0 \text{ g/m}^3$, findes også i beregningerne.

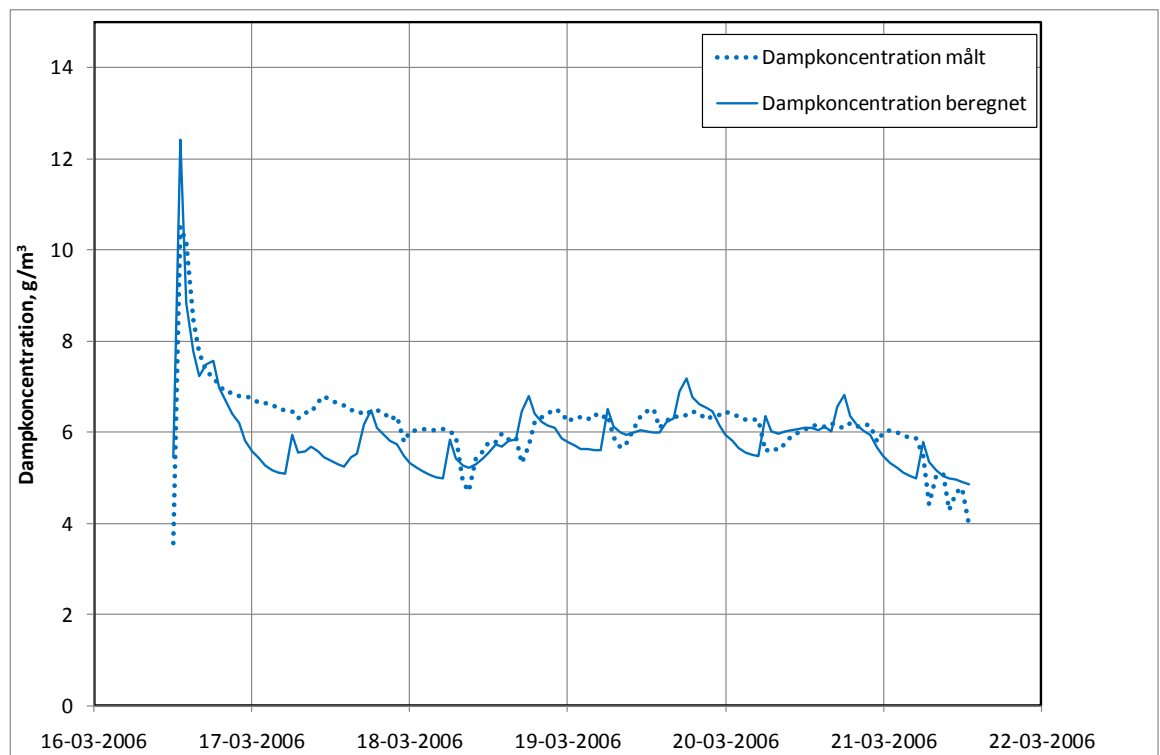
I de efterfølgende dage er der nogen variation mellem dampkoncentrationens udsving i løbet af døgnene, og dette må tillægges at beregningens antagelse om døgnvariationen af rummets belastning ikke helt passer med den faktiske anvendelse. Der er fx noget der tyder på, at man har foretaget en god udluftning af rummet sidst på formiddagen den 18. marts, som beregningen ikke helt har kunnet eftergøre.

Tabel 2 Summarisk dokumentation af BSim-modellen for det fuldmurede hus i Rødvig.

Fuldmuret hus 2006					
Building	Design Heat Loss, W	Rotation, deg		Volume, m³	
Fuldmuret hus		325		90.2993	139.123
Site	Weather File	Ground		Terrain Type	
Site197	2006data.dry	Ground200		Urban	
Thermal Zone	Design Heat Loss, W	Floor Area, m²		Volume, m³	
ThermalZone190		38.5895	46.5293	90.2993	139.123
Rum		38.5895	46.5293	90.2993	139.123
Enclosing Elements	Building Element	Thick, m - U, W/m² K		Net Area, m²	
Constructions	Marmorgulv I75 C100 I50	0.375	0.192206	38.5895	
	Br 39I100 Br - kalkpudset	0.341	0.257796	49.1819	
	Pu Tr 39I200	0.275	0.181712	38.5895	
Windoors	Interior door, glazed	4.83516		2.88	
	Interior door, wood	1.50734		3.248	
	Door with glazing	1.9996		5.94	
	Super LowE-Ar in wood frame	1.354		1	
	Super LowE-Ar in wood frame	1.55894		0.7452	
Systems	Component	Control		Time	
Heating	Heating191	HeatCoolCtrl192		Always	
Infiltration	Infiltration193	FullLoad		Always	
MoistureLoad	MoistureLoad194	KI14 Døgnprofil		ThWeek11 Always	



Figur 2 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til det fuldmurede hus.



Figur 3 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs vanddampkoncentration efter fugttilførsel til det fuldmurede hus.

2.2 Træhuset

Figur 4 viser BSim modellen af træhuset i Hørsholm, og Tabel 4 viser en summarisk dokumentation af modellen.

Konstruktioner

Indefra regnet er vægkonstruktionerne modelleret som 13 mm gipsplade, dampspærre med Z-værdi på $250 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$, 200 mm mineraluld og udvendig bræddebeklædning ligeledes af 25 mm gran. Væggenes indvendige overflade regnes behandlet med en maling med Z-værdi på $2,5 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$.

Der er indsat vinduer og døre som vist på Figur 1. Udvendige vinduer har energiruder med center U-værdi på $2,0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, og vinduerne er udført med 100 mm ramme/karm af træ.

Gulvet er regnet som et lakeret parketgulv af 25 mm bøgetræ, hvorunder kommer 75 mm mineraluld, 100 mm klaplag af beton, 100 mm polystyren isolering og 100 mm kapillarbrydende stenlag. Gulvets lakering regnes af have en Z-værdi på $10 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$.

Den skrå loftkonstruktion består af et listeloft af 25 mm granbrædder, fulgt af dampspærre med Z-værdi på $250 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$, og 250 mm mineraluldisolering. Loftet er ubehandlet på indersiden.

Termiske forhold

Bygningen regnes med et opvarmningssystem med et setpunkt på $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$, hvilket sammen med de periodiske stigninger i lufttemperaturen på grund af andre varmetilskud gør, at den beregnede gennemsnitstemperatur svarer til den målte i måleperioden ($20,3^\circ\text{C}$). Der regnes med en konstant infiltration, der giver et luftskifte på $0,25 \text{ h}^{-1}$, sådan som det blev målt i huset, da forsøget fandt sted.

Fugttilskud

Huset påregnes at have et normalt dagligt fugttilskud på 3 kg fordelt jævnt før Tabel 3.

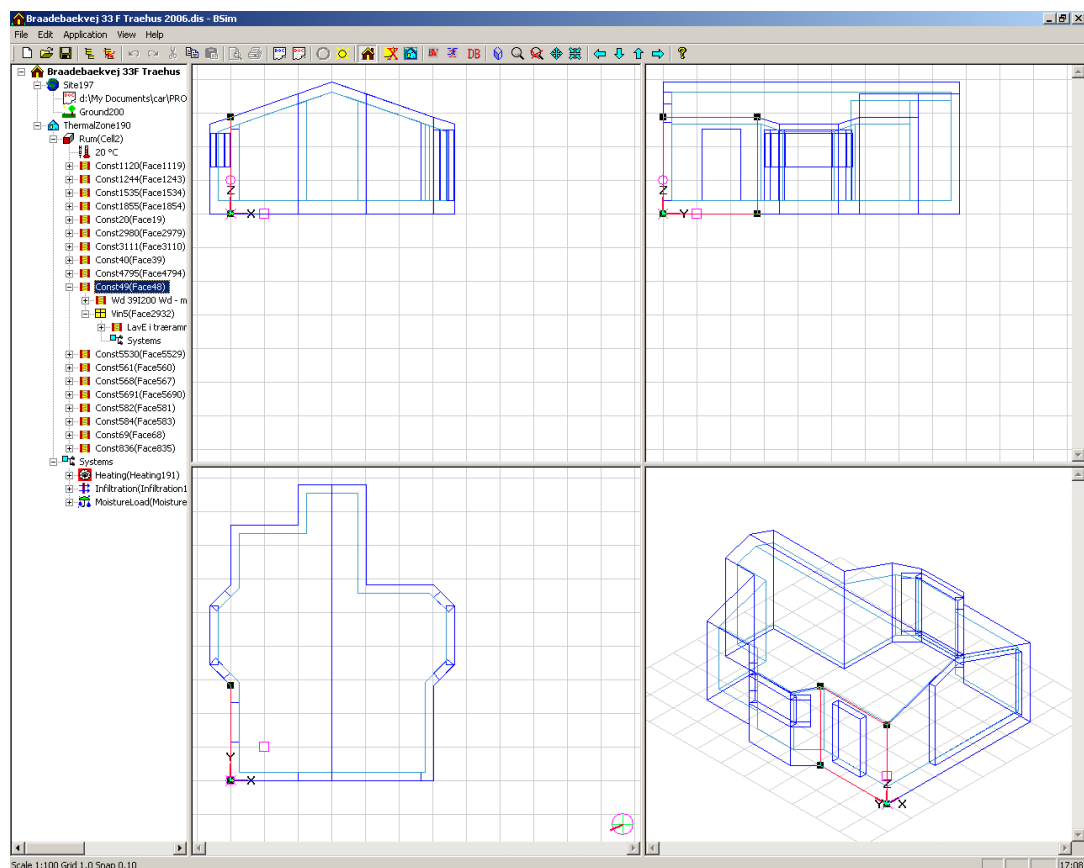
Tabel 3 Fugttilskud for træhuset

Fugttilskud	kl. 6-7 kl. 17-19	kl. 15-17 kl. 19-23	Øvrige timer	Samlet fugttilskud
Træhus	308 g/h	154 g/h	77 g/h	3000 g/døgn

Den 8. marts kl. 15-16 regnes med en fugtbelastning af en times varighed, der frigiver 1023 gram vanddamp som i eksperimentet.

Simuleringer

Simuleringerne er kørt fra den 1. januar 2006. Der er benyttet følgende simuleringssparametre: "Optimized Simulation", "Moisture Transport", "Glazing Temperature", "Longwave Radiation to Sky", og "Latent Heat". Der er regnet med interne tidsstep på 1 min (60 step pr. time), og en maksimal tykkelse af de kontrolvolumener, materialerne opdeles i, på 1 cm.



Figur 4 BSim model af træhuset i Hørsholm.

Figur 5 viser sammenligningen mellem de målte og beregnede forløb af temperatur og relative fugtighed i dagene efter fugttilførslen den 8. marts. I henhold til målingerne stiger den relative fugtighed med mindre end 10 %-RF, medens stigningen i henhold til beregningerne er ca. 21 %-RF. Forøgelsen af relativ fugtighed i luften har således været målt til at være meget mindre end simuleringen forudsiger.

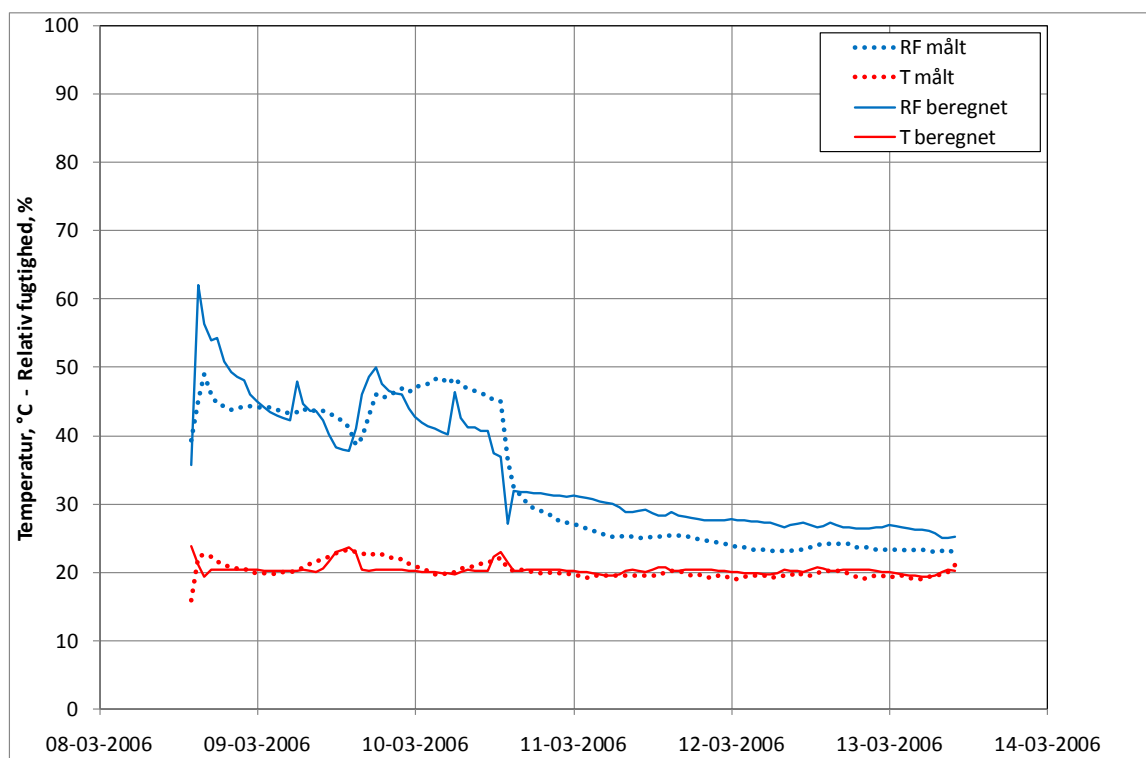
Omvendt ser det ud til, at det målte henfald i relativ fugtighed efter fugttilførslen har været meget lille i de første $1\frac{1}{2}$ døgn, hvorefter henfaldet pludseligt kommer. Det formodes, at der lidt over middag den 10. marts er sket en kraftig udluftning af huset, og at der ikke de efterfølgende tre dage har været noget nævneværdigt fugttilskud i boligen. I beregningerne er dette simuleret som en udluftning på 5 h^{-1} den 10. marts kl. 14-15, hvorefter der ikke regnes med fugttilskud i boligen frem til og med den 13. marts.

Figur 6 viser de målte og simulerede forløb af indendørs vanddampkoncentration. Dampkoncentrationsforøgelsen i forbindelse med forsøget var på $3,5 \text{ g/m}^3$, hvilket stemmer godt overens med beregningernes $3,7 \text{ g/m}^3$.

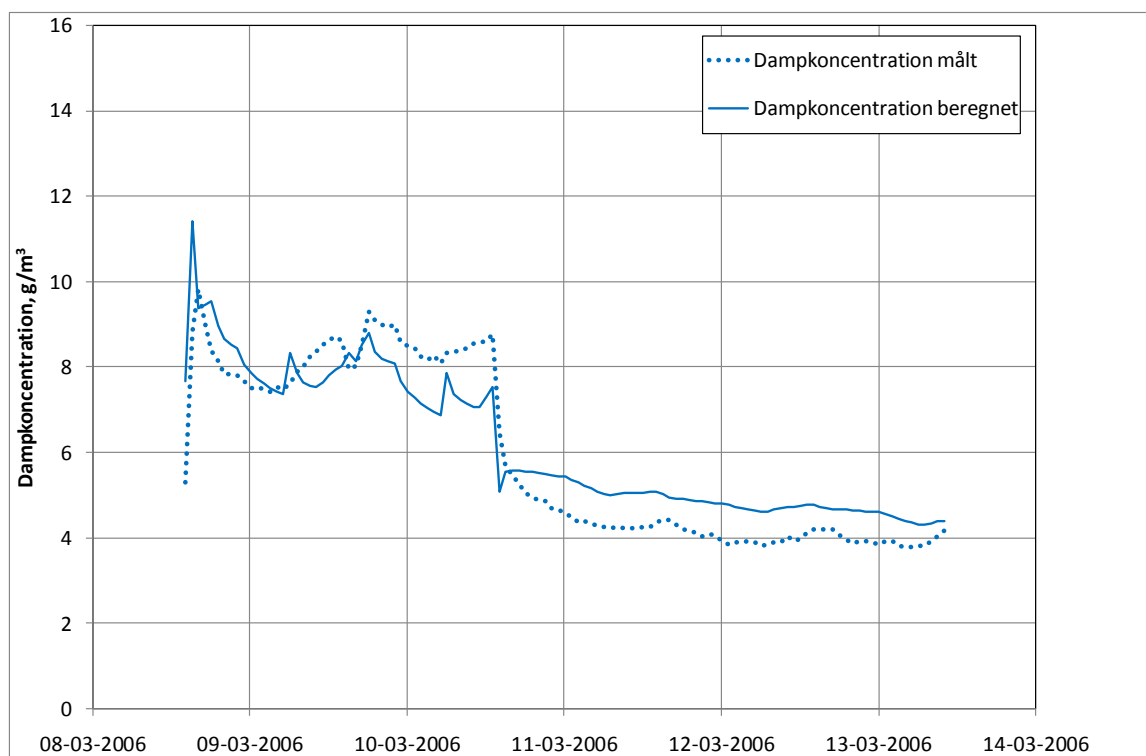
Alt i alt må det betragtes at mulighederne for at simulere de målte forløb af temperaturer og fugtforhold i træhuset er rimelige, givet det manglende kendskab til de virkelige forhold i huset.

Tabel 4 Summarisk dokumentation af BSim-modellen for træhuset i Hørsholm.

Traehus 2006					
Building	Design Heat Loss, W	Rotation, deg	Volume, m³		
Traehus	2766.61	116	110.627		160.849
Site	Weather File	Ground	Terrain Type		
Site197	2006data.dry	Ground200	Urban		
Thermal Zone		Design Heat Loss, W	Floor Area, m²		Volume, m³
ThermalZone190		2766.61	40.0399	47.462	110.627 160.849
Rum		2766.61	40.0399	47.462	110.627 160.849
Enclosing Elements		Building Element	Thick, m - U, W/m² K		Net Area, m²
Constructions		Gy 39I200 Wd	0.25	0.179484	51.0395
		Wd 39I250 vent	0.275	0.14796	42.4011
		Wd I75 C100 I50	0.375	0.178658	40.0399
Windows		LavE i træramme	1.95714		22.0305
Systems		Component	Control		Time
Heating		Heating191	HeatCoolCtrl192		Always
Infiltration		Infiltration193	FullLoad		Always
MoistureLoad		MoistureLoad194	FullLoadAt16 No load No load No load Dagprofil		WeWeek10 10-03-08 RestOfWeek10 Week11 Always
Venting		Venting657	VentingCtrl659		10-03-06 kl 14



Figur 5 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til træhuset.



Figur 6 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs vanddampkoncentration efter fugttilførsel til træhuset.

2.3 Det murede hus

Figur 7 viser BSim modellen af det murede hus i Hørsholm, og Tabel 6 viser en summarisk dokumentation af modellen. Den "termiske zone", som simuleringen udføres for består af husets køkken/alrum sammen med havestuen. Det er disse to rum, der er samlet oplysninger om ved udførelse af eksperimenterne i huset, og det er derfor disse oplysninger, der bruges i simuleringerne. De tilgrænsende rum i huset er der kun gisninger om, og oplysningerne om disse rum påvirker ikke direkte beregningerne. Gisningerne passer dog udmærket med de oplysninger, der kan fås fra den Offentlige Informationsserver.

Konstruktioner

Indefra regnet er vægkonstruktionerne modelleret som 100 mm letbetonelementer, med densitet 500 kg/m^3 , 125 mm mineraluldsisolering, og formur af 108 mm murværk. Væggenes indvendige overflade regnes behandlet med en maling med Z-værdi på $2,5 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$.

Der er indsat vinduer og døre som vist på Figur 1. Udvendige vinduer har energiruder med center U-værdi på $2,0 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, og vinduerne er udført med 100 mm ramme/karm af træ.

Gulvet er i havestuen regnet som et olieret trægulv af 25 mm bøgetræ, 100 mm klaplag af beton, 150 mm polystyren isolering og 100 mm kapillarbrydende stenlag. Trægulvets oliebehandling regnes at have en Z-værdi på $0,5 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$.

Køkken/alrummets gulv består af 25 mm glaserede tegl, der ligeledes er lagt på 100 mm beton, 150 mm polystyren isolering og 10 mm kapillarbrydende stenlag. Glaserings Z-værdi er regnet til $10 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$.

Den vandrette loftkonstruktion består af et listeloft af 25 mm granbrædder, fulgt af dampspærre (Z-værdi $250 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$) og 250 mm mineraluldsisolering. Loftet er ubehandlet på indersiden.

Termiske forhold

Rummene regnes med et opvarmningssystem med et setpunkt på $22,20^\circ\text{C}$, hvilket sammen med de periodiske stigninger i lufttemperaturen på grund af andre varmetilskud gør, at den beregnede gennemsnitstemperatur svarer til den målte i måleperioden ($22,4^\circ\text{C}$). Der regnes med en konstant infiltration, der giver et luftskifte på $0,48 \text{ h}^{-1}$, sådan som det blev målt i huset, da forsøget fandt sted.

Fugttilskud

Rummene påregnes at have et normalt fugttilskud på $3,0 \text{ kg/døgn}$ fordelt jævnt før Tabel 5.

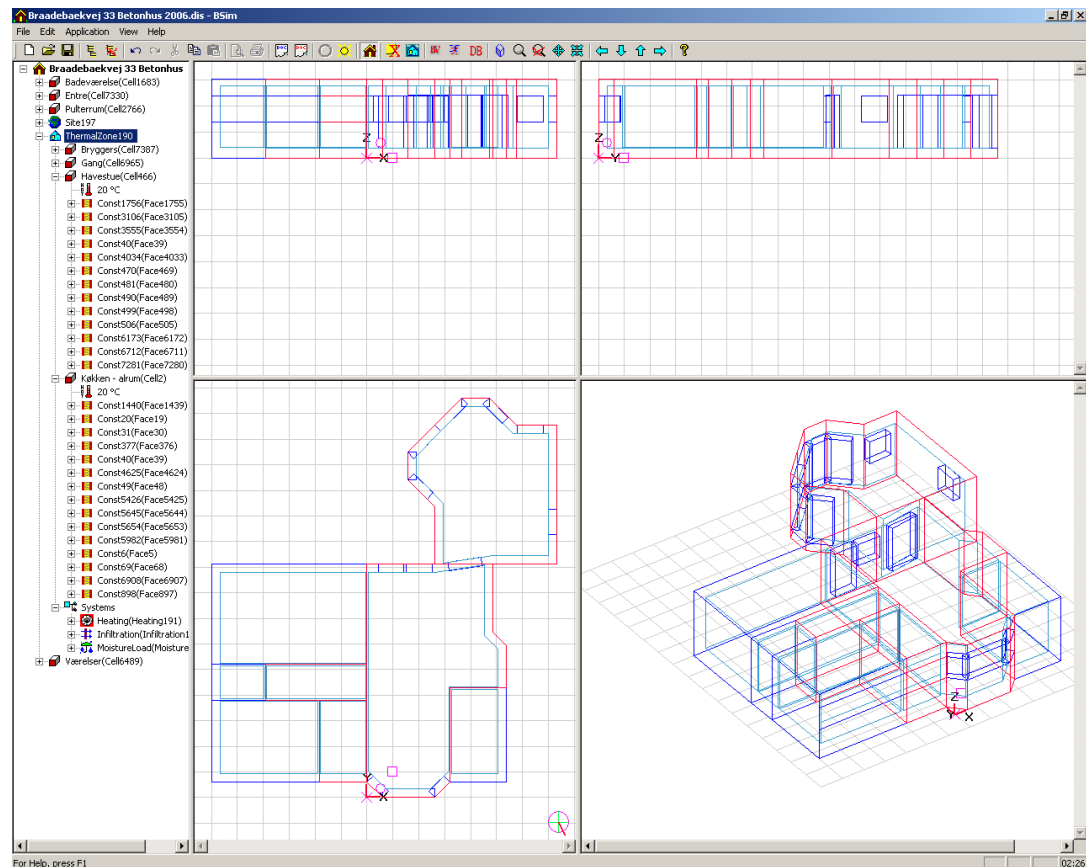
Tabel 5 Fugttilskud for køkken/alrum og havestue i det murede hus

Fugttilskud	kl. 6-7 kl. 17-19	kl. 15-17 kl. 19-23	Øvrige timer	Samlet fugttilskud
Træhus	308 g/h	154 g/h	77 g/h	3000 g/døgn

Den 22. maj kl. 16-17 regnes med en fugtbelastning af en times varighed, der frigiver 1602 gram vanddamp som i eksperimentet.

Simuleringer

Simuleringerne er kørt fra den 1. januar 2006. Der er benyttet følgende simuleringsparametre: "Optimized Simulation", "Moisture Transport", "Glazing Temperature", "Longwave Radiation to Sky", og "Latent Heat". Der er regnet med interne tidsstep på 1 min (60 step pr. time), og en maksimal tykkelse af de kontrolvolumener, materialerne opdeles i, på 1 cm.



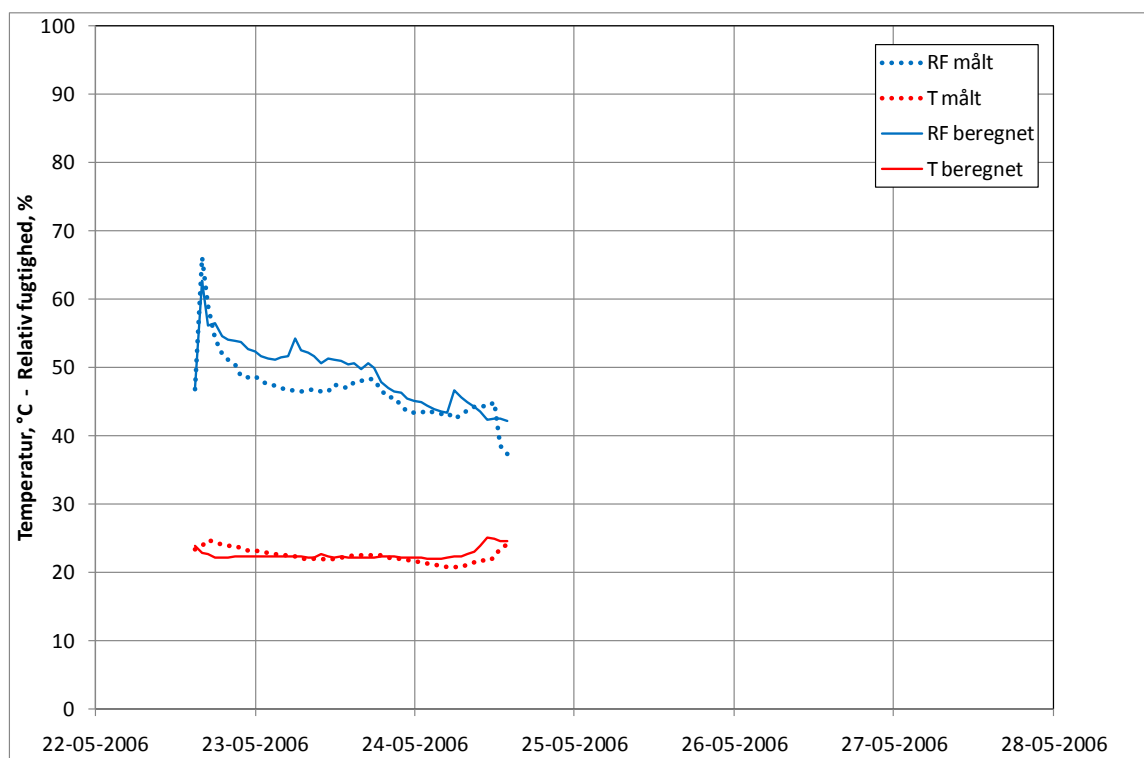
Figur 7 BSim model af det murede hus i Hørsholm. Modellen omfatter kun husets køkken/alrum, havestue, bryggers og gang.

Figur 8 viser sammenligningen mellem de målte og beregnede forløb af temperatur og relative fugtighed i dagene efter fugttilførslen den 22. maj 2006. Det bemærkes her, at måleperioden for det murede hus er 2 døgn modsat måleperioderne for det fuldmurede hus og træhuset, der er henholdsvis 5 døgn, og 4 døgn og 20 timer.

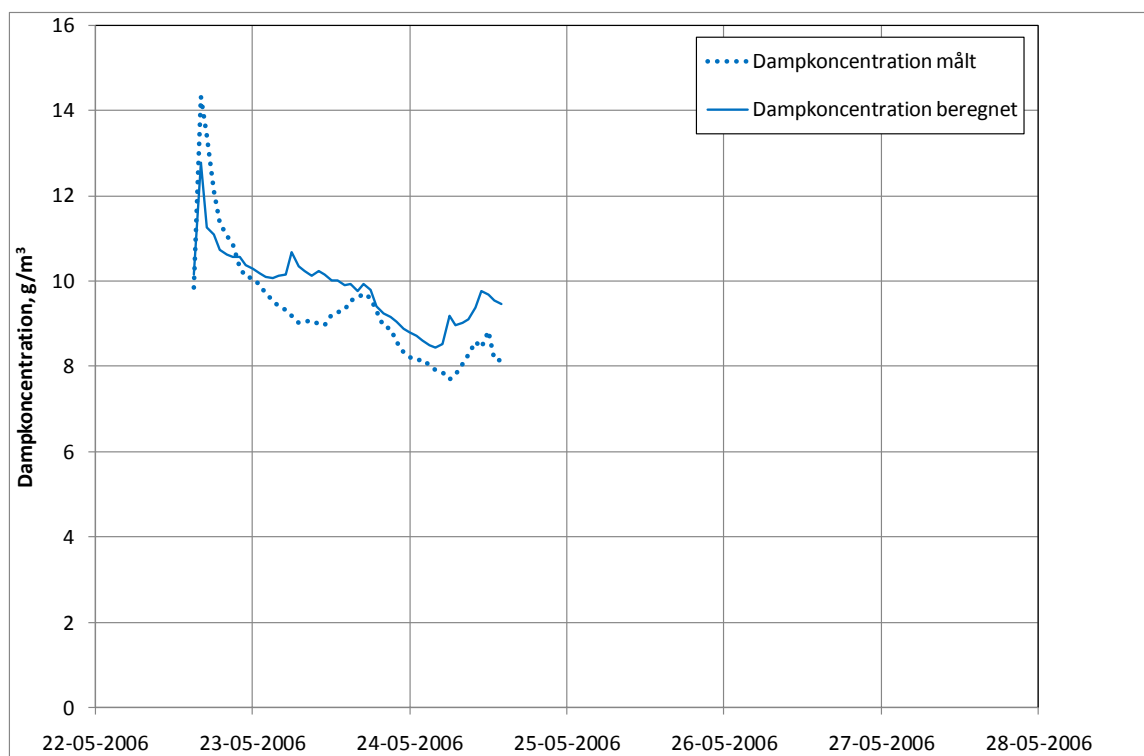
Den relative fugtighed stiger med ca. 19 %-RF i henhold til målingerne, men kun med 16 %-RF i henhold til beregningerne, når forsøget afvikles. Der er en vis overensstemmelse mellem de målte og beregnede forløb af fugtniveauets henfald efter fugttilskuddets ophør, når det påtænkes at de aktuelle aktiviteter i bygningen ikke har været kendte.

Figur 9 viser forløbet af den målte og beregnede indendørs vanddampkoncentration. De to forløb følger nogenlunde pænt hinanden. Den målte stigning i dampkoncentration ved afvikling af forsøget har været på $4,5 \text{ g/m}^3$, medens den simulerede dog kun har været på $2,6 \text{ g/m}^3$.

Beregningen af fugtudsvingene vurderes overordnet set at give god overensstemmelse med feltforsøgets målinger.



Figur 8 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til det murede hus.



Figur 9 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs vanddampkoncentration efter fugttilførsel til det murede hus.

Tabel 6 Summarisk dokumentation af BSim-modellen for det murede hus i Hørsholm.

Muret hus 2006					
Building		Design Heat Loss, W	Rotation, deg	Volume, m³	
Muret hus			206	248.131	383.302
Site		Weather File	Ground	Terrain Type	
Site197		2006data.dry	Ground200	Urban	
Thermal Zone	Design Heat Loss, W	Floor Area, m²		Volume, m³	
ThermalZone190		65.4365	78.5304	157.048	239.518
Køkken - alrum		32.6854	37.552	78.445	114.534
Havestue		22.9662	29.7092	55.119	90.6131
Bryggers		4.8545	5.8389	11.6508	17.8086
Gang		4.93038	5.43035	11.8329	16.5626
Enclosing Elements	Building Element	Thick, m - U, W/m² K		Net Area, m²	
Constructions	Pls 45I70 Pls				
	AEC100 39I125 Br100 - malet	0.096	0.513992	76.6353	
	Wd 39I250 vent	0.341	0.254197	50.0522	
	Klinkegulv i det murede hus - glaseret	0.275	0.14796	32.6854	
	Marmorgulv I75 C100 I50	0.375	0.191184	32.6854	
	Wd 39I250 vent	0.375	0.192206	22.9662	
	Wd 39I250 vent	0.275	0.14796	22.9662	
	Wd 39I250 vent	0.275	0.14796	4.8545	
	Klinkegulv i det murede hus - glaseret	0.375	0.191184	4.8545	
	Wd 39I250 vent	0.275	0.14796	4.93038	
	Marmorgulv I75 C100 I50	0.375	0.192206	4.93038	
	Windows	LavE i træramme	1.93238		6.693
Interior door, glazed		4.78619		5.33	
LavE i træramme		1.96191		12.6492	
LavE i træramme		1.94		1	
LavE i træramme		1.97022		3.04656	
Systems	Component	Control		Time	
Heating	Heating191	HeatCoolCtrl192		Always	
Infiltration	Infiltration193	FullLoad		Always	
MoistureLoad	MoistureLoad194	kl17 Døgnprofil		MoWeek21 Always	

3 Helårssimuleringer

3.1 Helårssimuleringer af det fuldmurede hus, træhuset og det murede hus

Der er gennemført helårssimuleringer af alle tre huse ved benyttelse af normale danske referenceårs vejrdata (Design Reference Year, DRY).

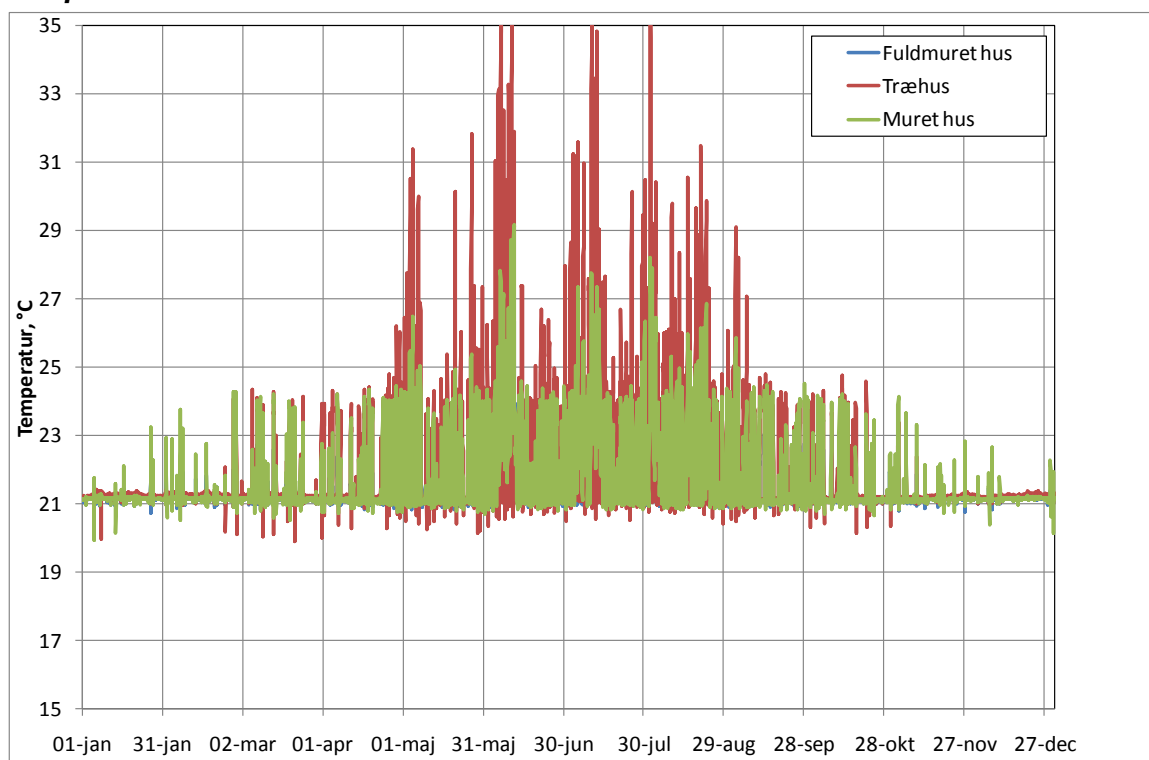
- Der er regnet med indendørs temperatursetpunkt på 21°C.
- Der er regnet med et fast luftskifte på 0,5h⁻¹.
- Der er regnet med udluftning på 3 h⁻¹, hvis den indendørs temperatur overstiger 24°C.

Der er regnet med fugttilskud på 2 kg/døgn for rummet i det fuldmurede hus og 3 kg/døgn for træhuset og det murede hus. Fugtlasten er fordelt over døgnet som i Tabel 7:

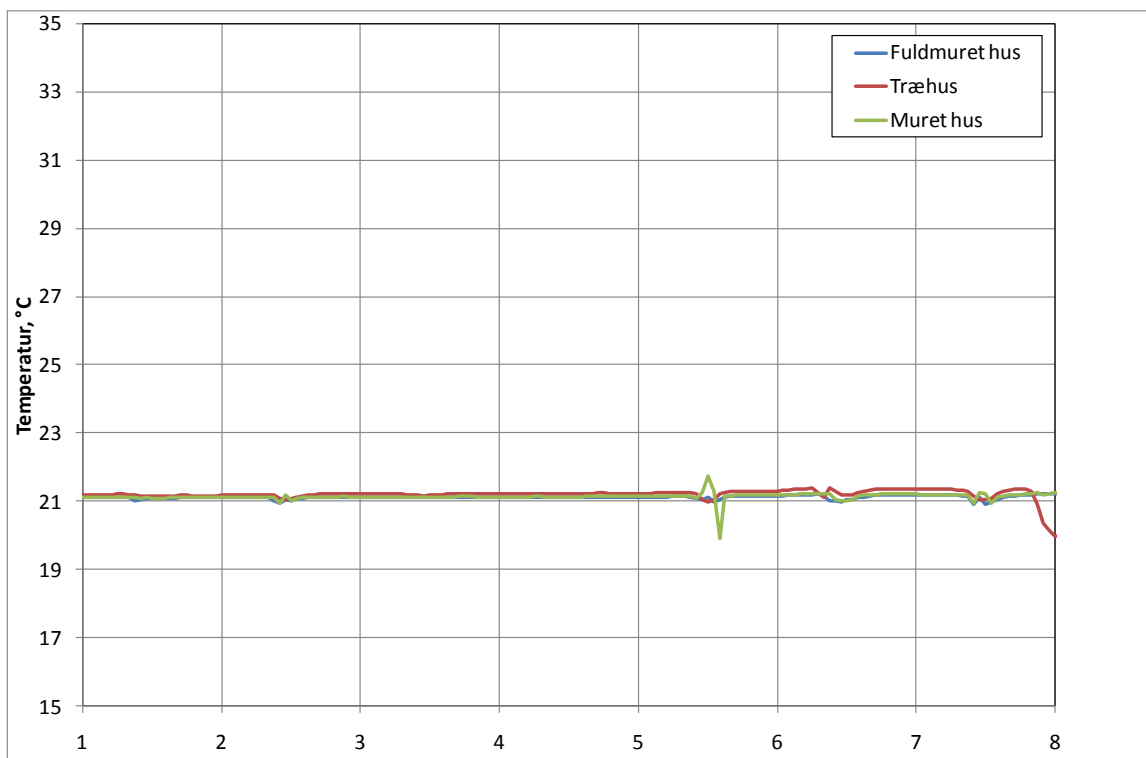
Tabel 7 Daglig fordeling af fugtlasten som anvendt i helårssimuleringer

Fugttilskud, g/h	kl. 6-7	kl. 15-17	Øvrige timer
	kl. 17-19	kl. 19-23	
Fuldmuret hus	205	103	51
Træhus	308	154	77
Muret hus	308	154	77

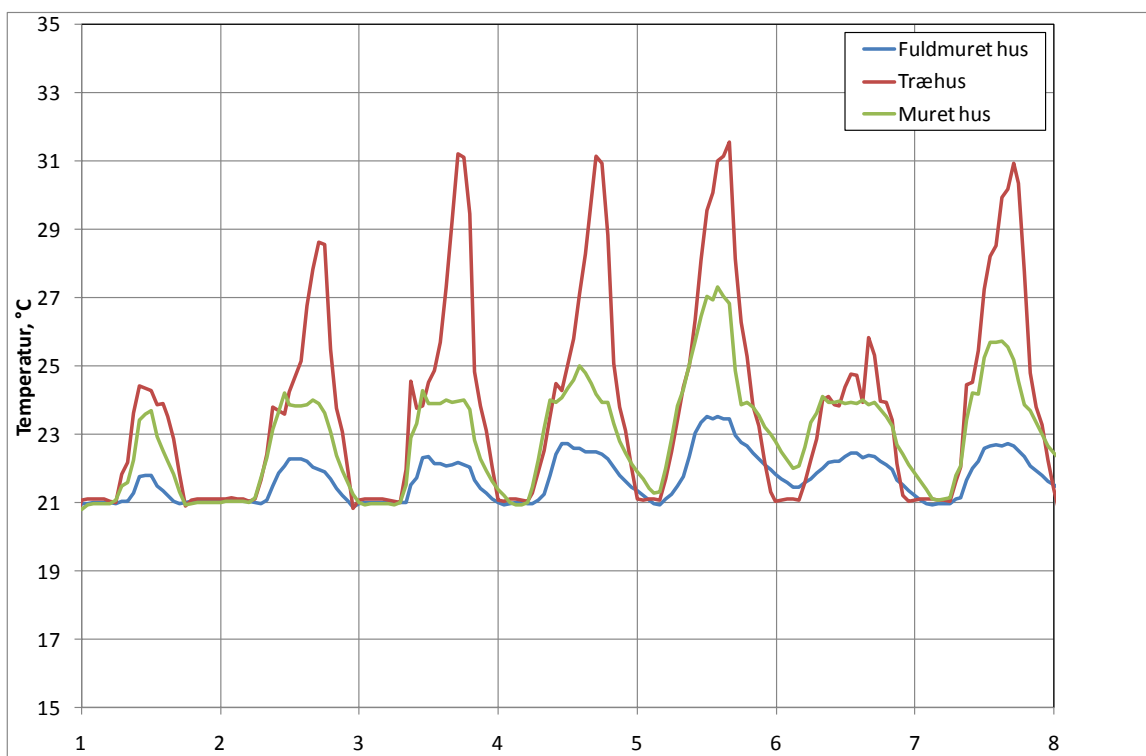
Temperaturforløb



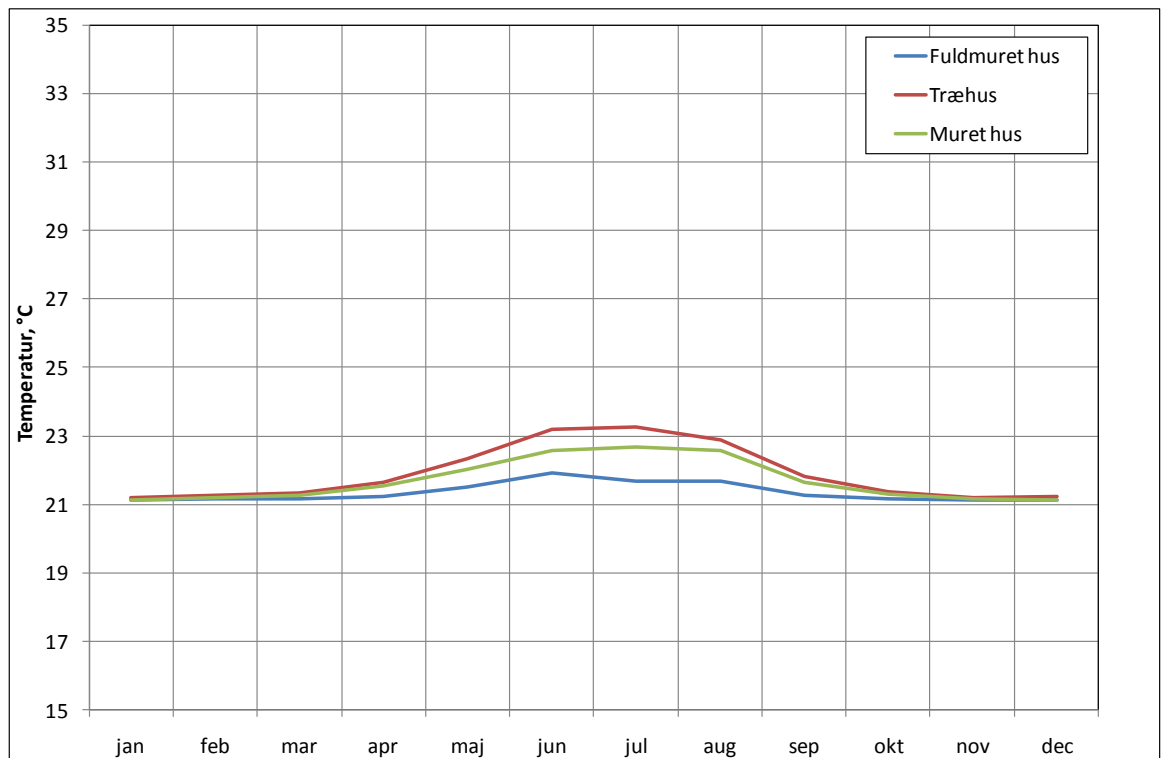
Figur 10 Timeværdier for den indendørs lufttemperatur gennem hele året.



Figur 11 Indendørs lufttemperatur i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



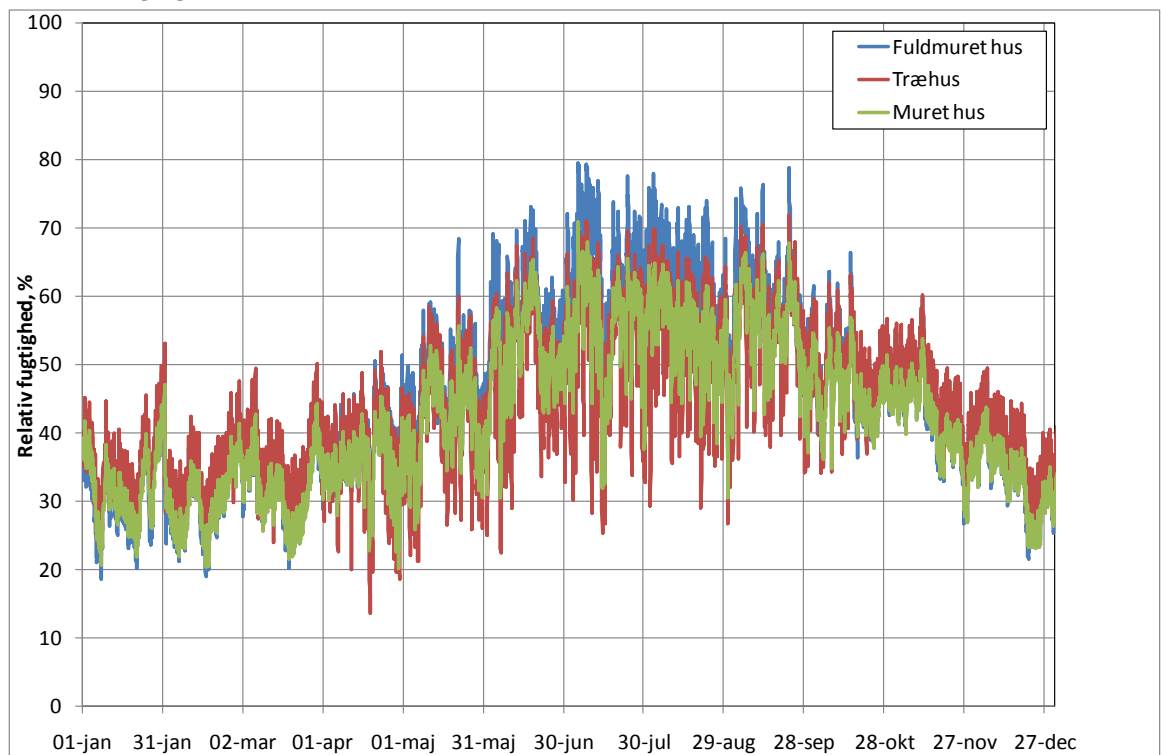
Figur 12 Indendørs lufttemperatur i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



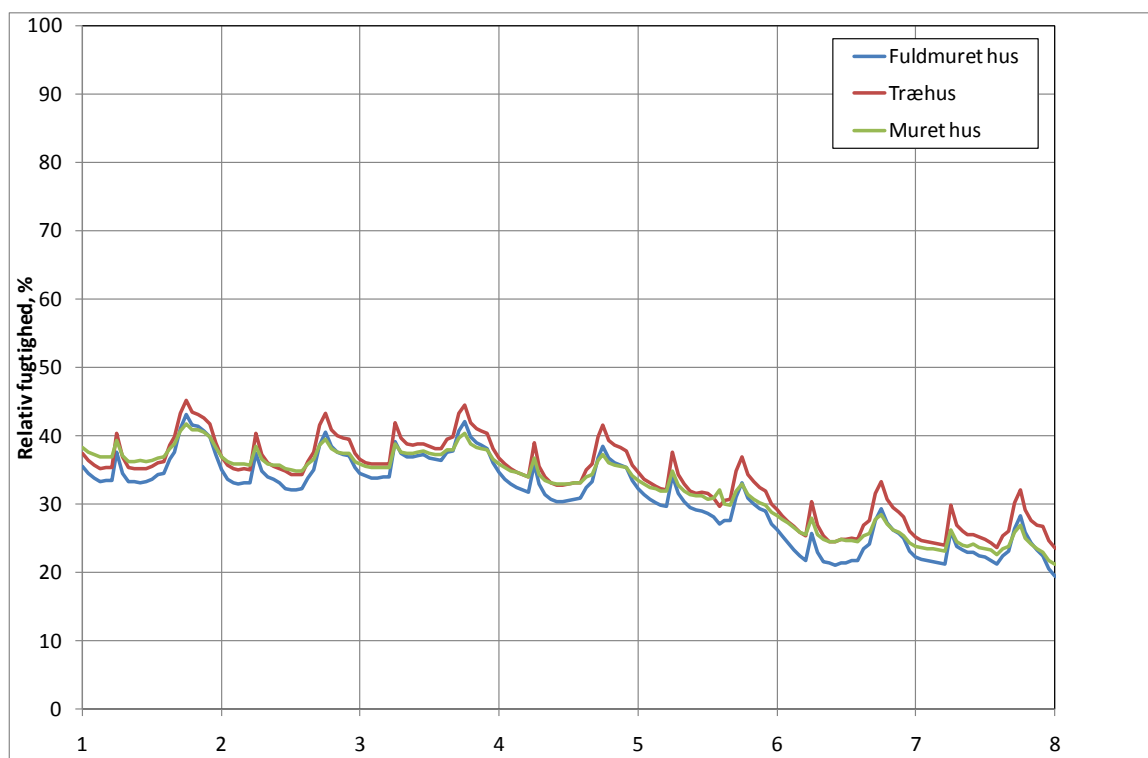
Figur 13 Månedsmidler af den indendørs lufttemperatur i løbet af året.

Der ses størst daglige og sæsonmæssige temperaturvariationer i træhuset, dernæst i det murede hus, og endelig er det fuldmurede hus det mest temperaturstabile.

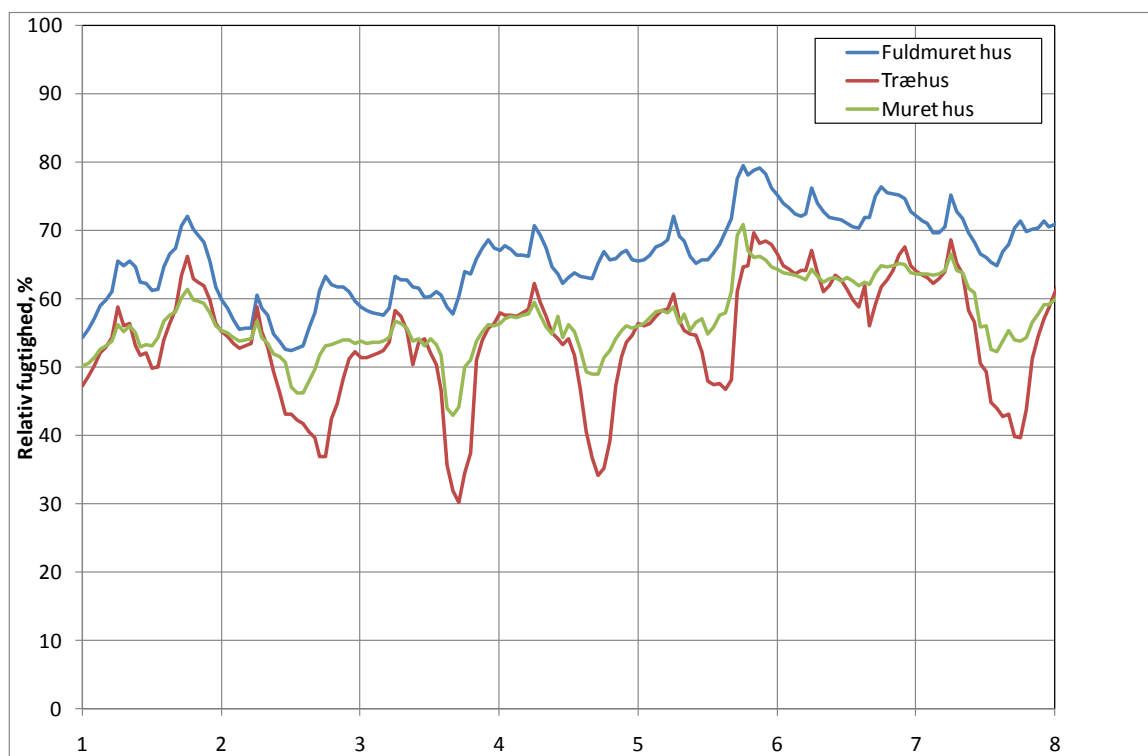
Relativ fugtigheds-forløb



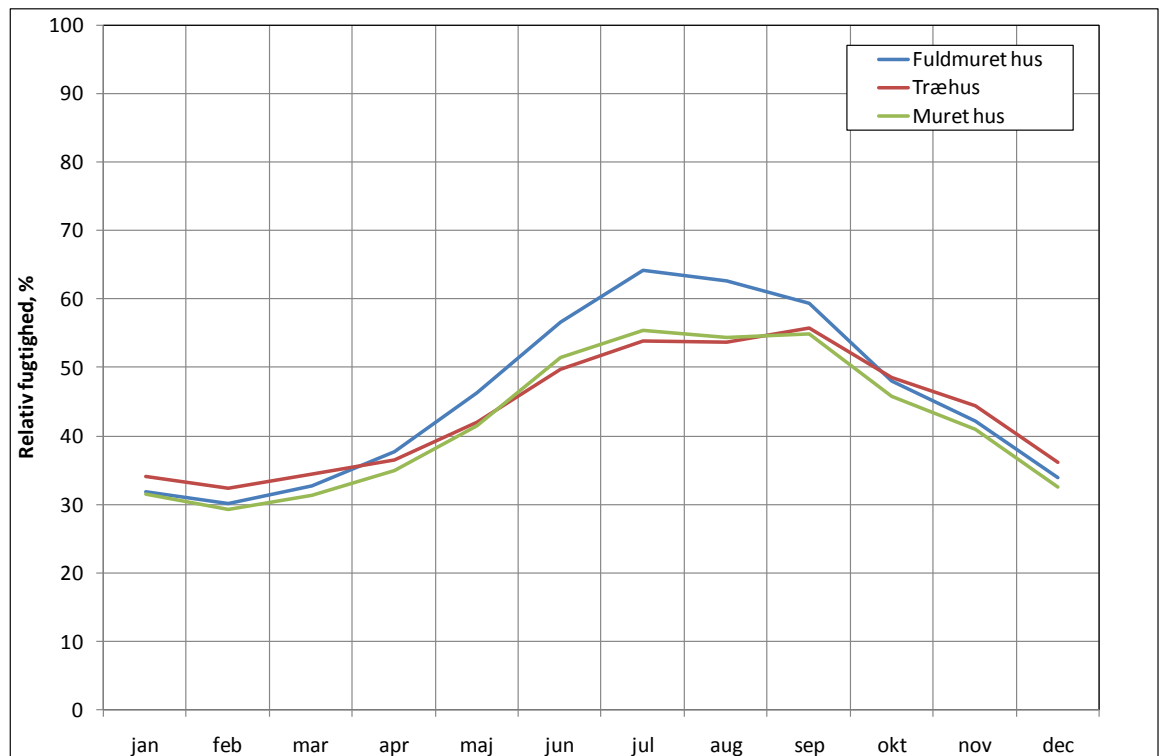
Figur 14 Timeværdier for den indendørs relative fugtighed gennem hele året.



Figur 15 Indendørs relativ fugtighed i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 16 Indendørs relativ fugtighed i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.

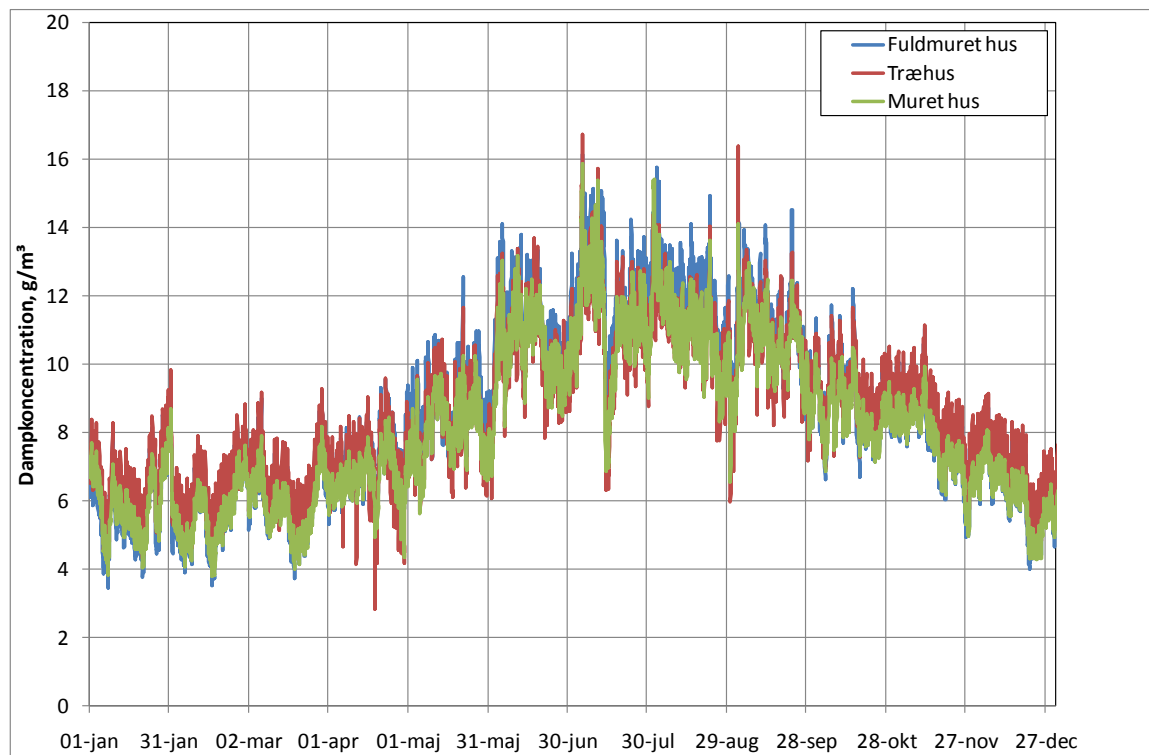


Figur 17 Månedsmidler af den indendørs relative fugtighed i løbet af året.

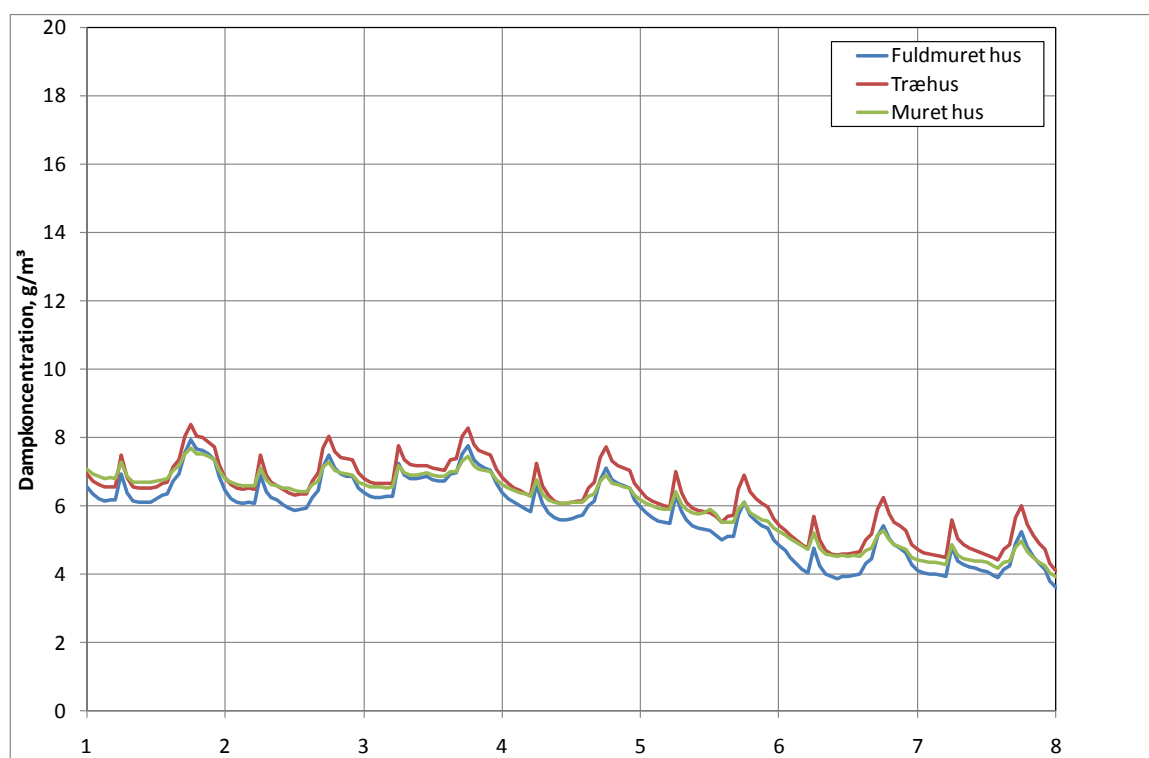
Forskelle i niveauerne og udsvingene i relativ fugtighed kan skyldes husenes forskellige geometri og de antagne fugtproduktionsrater i bygningerne, hvilket formentlig er mere betydende end selve materialevalget. Desuden spiller forskellene i indendørs lufttemperaturer (navnlig i sommerhalvåret) en rolle for den relative fugtighed. Den tilsyneladende mindre variation i månedsmidler af relativ fugtighed for træhuset i forhold til det fuldmurede hus og det murede hus, skyldes at i sommerhalvåret, hvor fugtigheden er høj, er temperaturen også højest i træhuset, hvilket alt andet lige giver en lavere RF.

Derfor ses der i de næste grafer på den indendørs vanddampkoncentration.

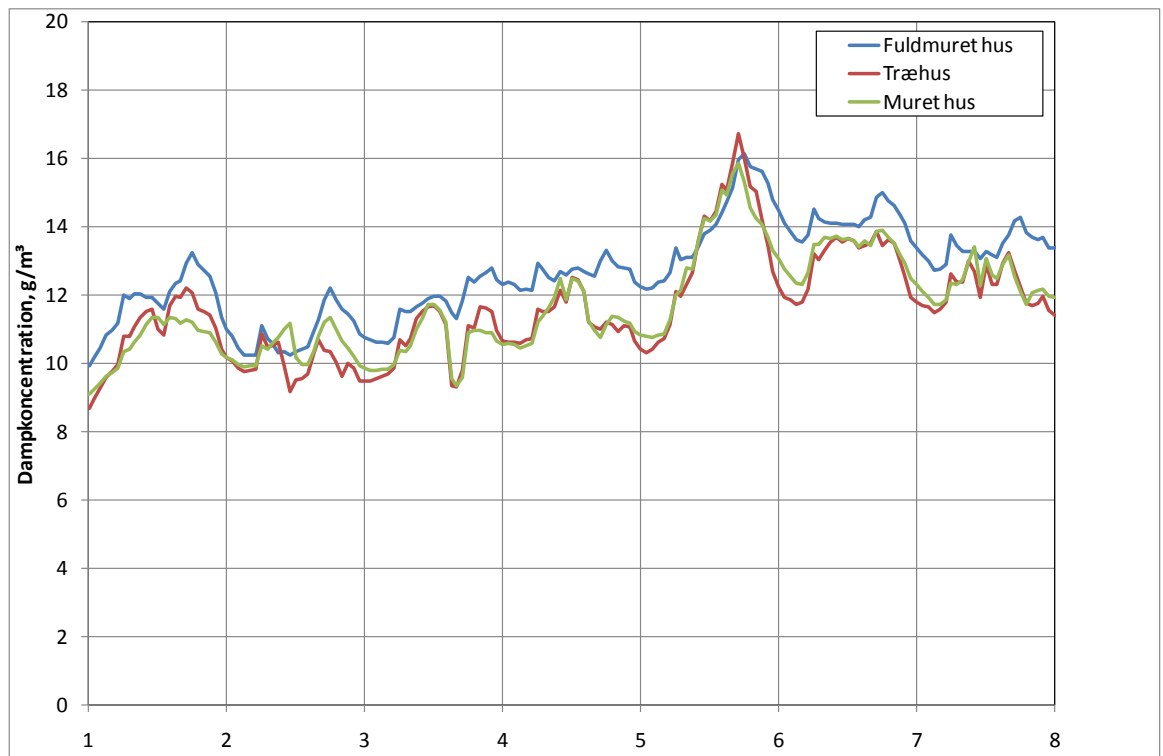
Dampkoncentrationsforløb



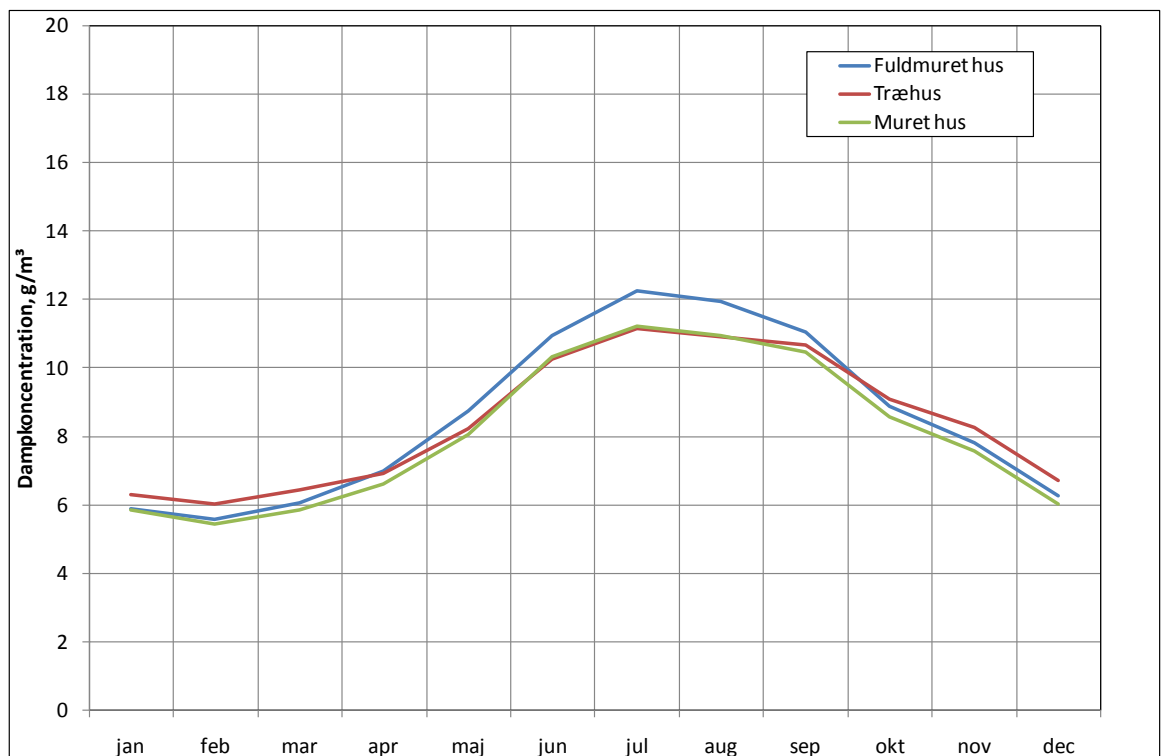
Figur 18 Timeværdier for den indendørs vanddampkoncentration gennem hele året.



Figur 19 Indendørs vanddampkoncentration i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 20 Indendørs vanddampkoncentration i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 21 Månedsmidler af den indendørs vanddampkoncentration i løbet af året.

Forskellene i dampkoncentration mellem de forskellige huse er ikke særlig markant. Månedsmiddelværdierne har en mindre sæsonmæssig variation i træhuset og er størst i det fuldmurede hus. Da træhuset har de højeste sommertemperaturer, er udluftningen større i dette hus end i de andre, og det vil bevirke, at dampkoncentrationen nærmer sig den udendørs – altså bliver lavere. Til sammenligning er der i det fuldmurede hus beregningsmæssigt kun ganske få timer om året, hvor der bliver behov for udluftning på grund af høje indendørs temperaturer.

3.2 Helårssimuleringer med konstruktioner af fuldmur, træ og kombinationsmur

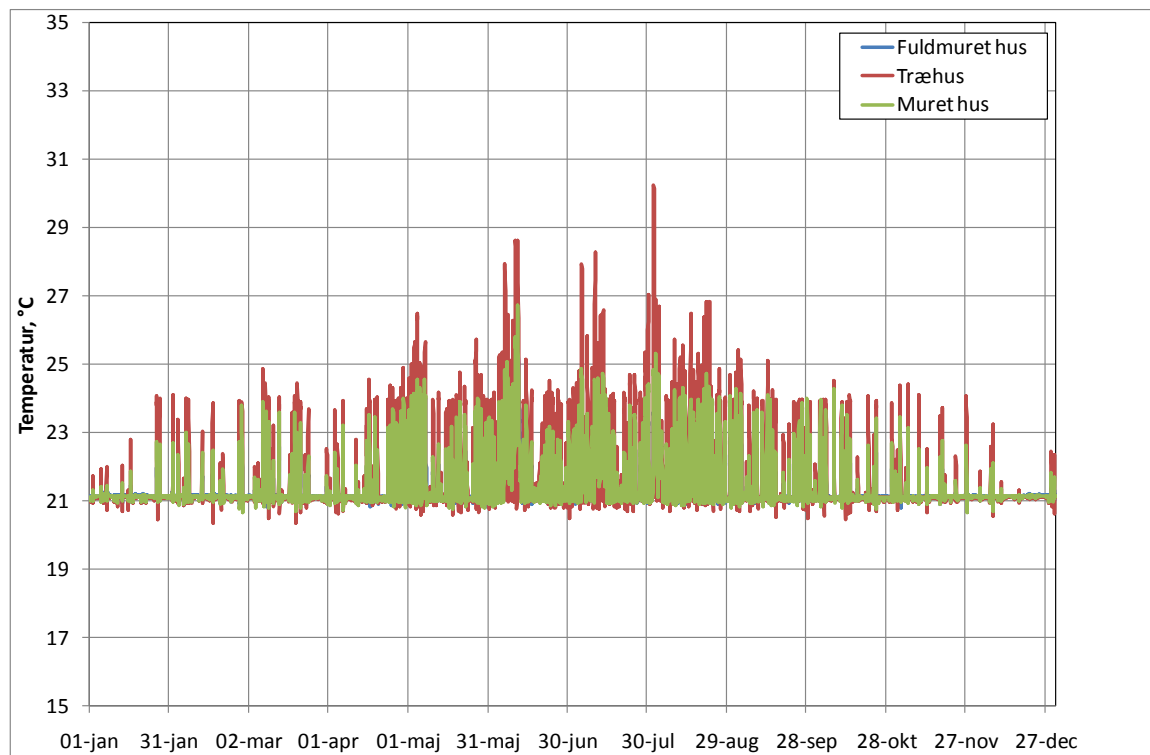
Der er gennemført tre simuleringer hvor geometri og beliggenhed fra huset i Rødvig er benyttet. Dette hus er oprindeligt med fuldmurede konstruktioner, men de tre simuleringer er gennemført således, at der på skift har været regnet med konstruktioner som i de øvrige huse. Husene har været ens i udformning og påvirkning, og kun materialevalget har varieret mellem husene jf. Tabel 8.. Konstruktionerne har ikke samme tykkelse, men dette er tilpasset i simuleringerne således, at det indendørs rumvolumen og arealerne af de indvendige konstruktionsoverflader bliver de samme husene imellem.

Tabel 8 *Oversigt over konstruktioner anvendt i de tre simuleringer*

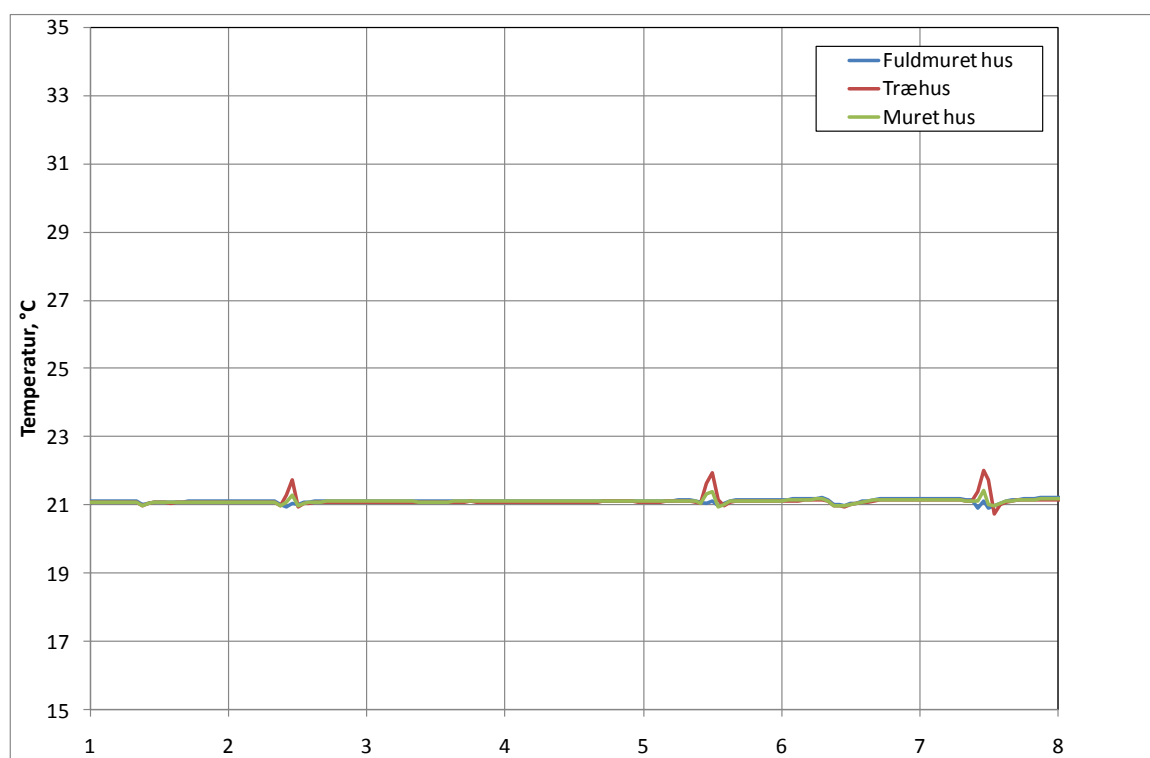
Simulering	Ydervæg	Gulv	Loft
Fuldmuret hus	Kalkpudset hulmursvæg af tegl	Marmorgulv på klaplag af beton	Kalkpudset loft på underlag af brædder
Træhus	Malet gipsplade på træskeletvæg	Lakeret parketgulv på strøer/isolering, klaplag og isolering	Ubehandlet loft af trælist
Muret hus	Malede letbetonelementer, isolering og muret formur	Olieret trægulv på klaplag af beton samt glaserede fliser af tegl på klaplag af beton	Ubehandlet loft af trælist

- Der benyttes normale danske referenceårs vejrdata (Design Reference Year, DRY).
- Der regnes med temperatursetpunkt på 21°C.
- Der regnes med et luftskifte på 0,5h⁻¹.
- Der regnes med udluftning på 3 h⁻¹ ved temperaturer over 24°C.

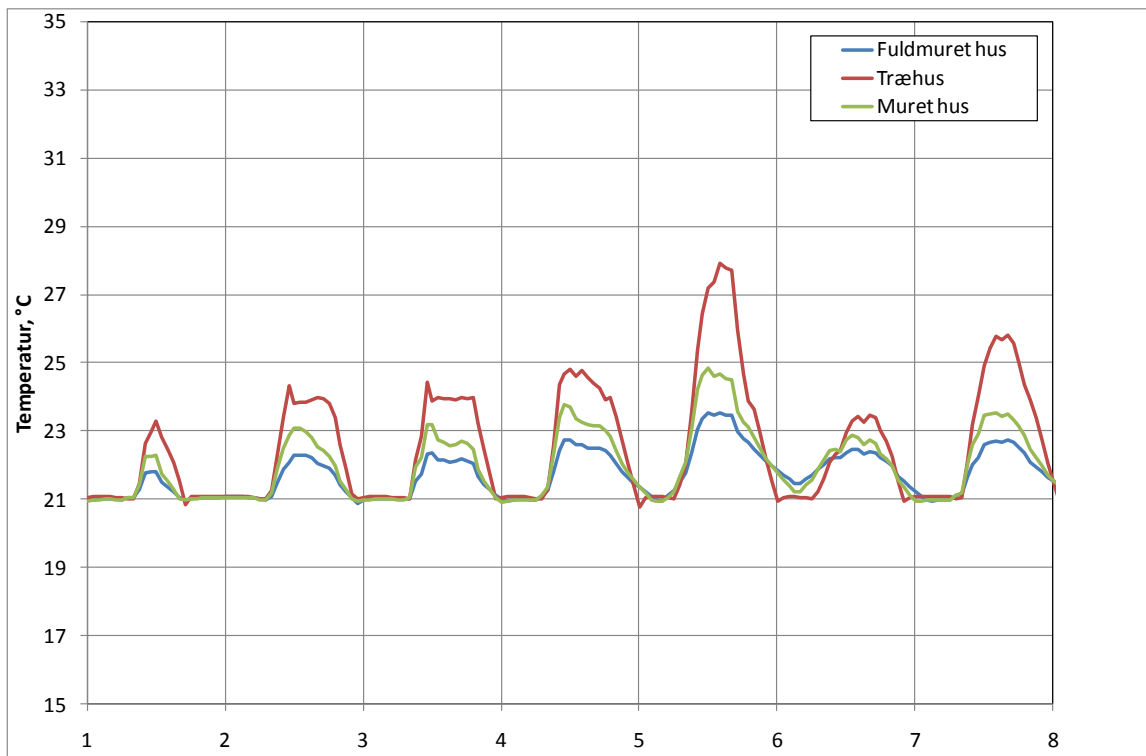
Temperaturforløb



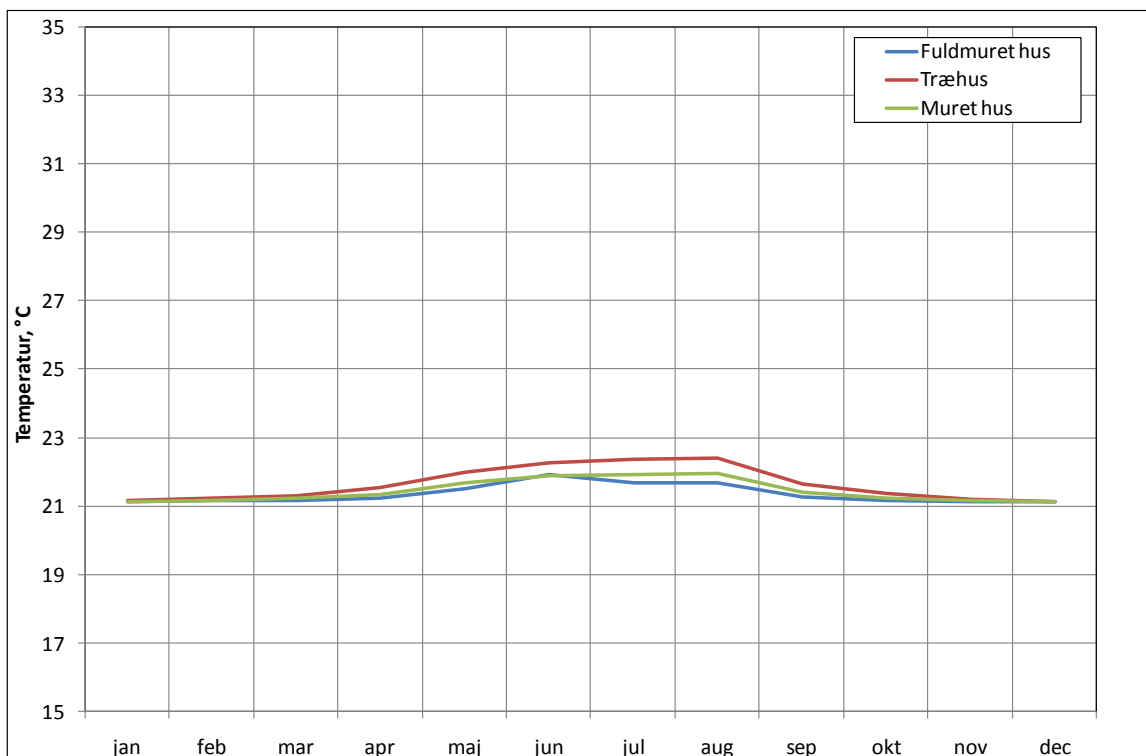
Figur 22 Timeværdier for den indendørs lufttemperatur gennem hele året.



Figur 23 Indendørs lufttemperatur i Uge 1 (primogenit). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



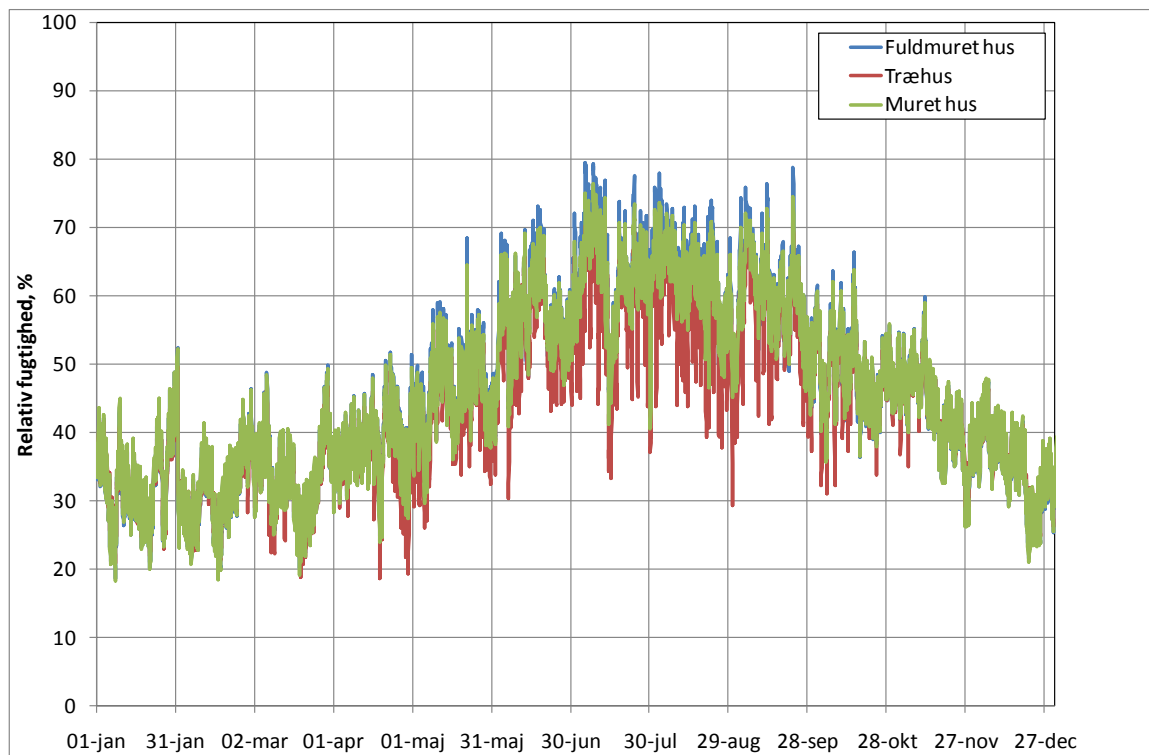
Figur 24 Indendørs lufttemperatur i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



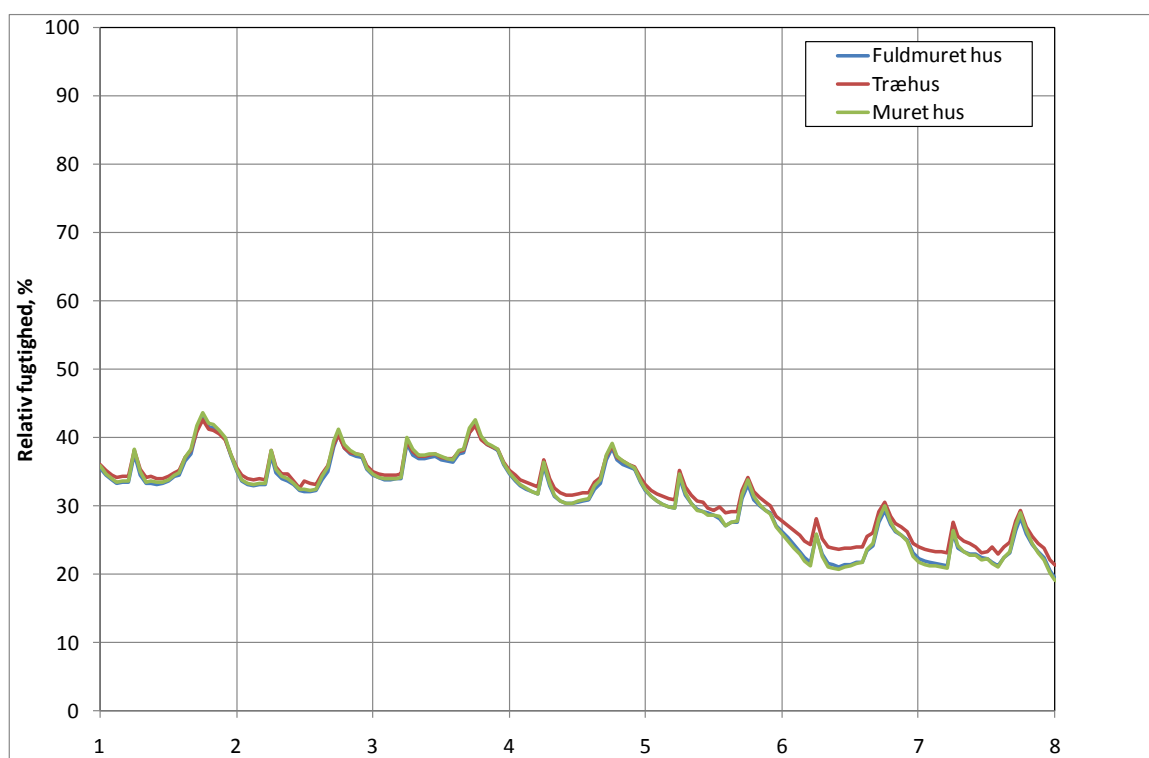
Figur 25 Månedsmidler af den indendørs lufttemperatur i løbet af året.

Beregningerne bekræfter, at det fuldmurede hus har det mest temperaturstabile indeklima, medens temperaturvariationerne er størst for træhuset.

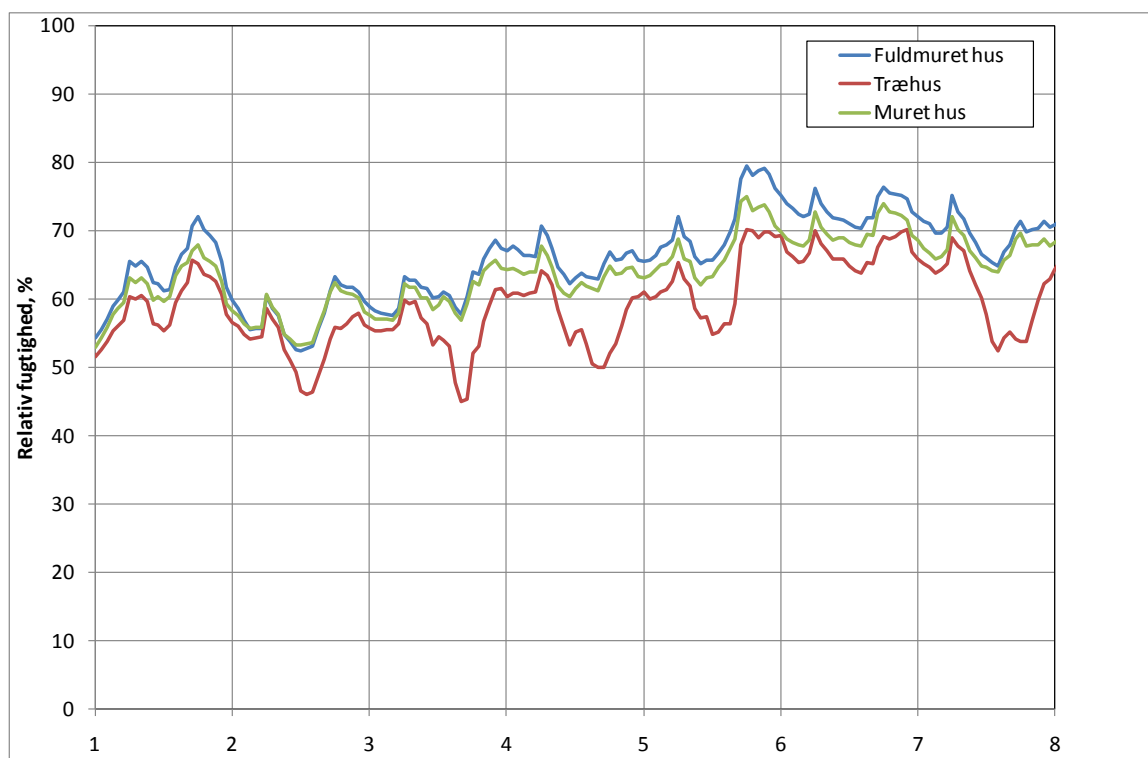
Relativ fugtigheds-forløb



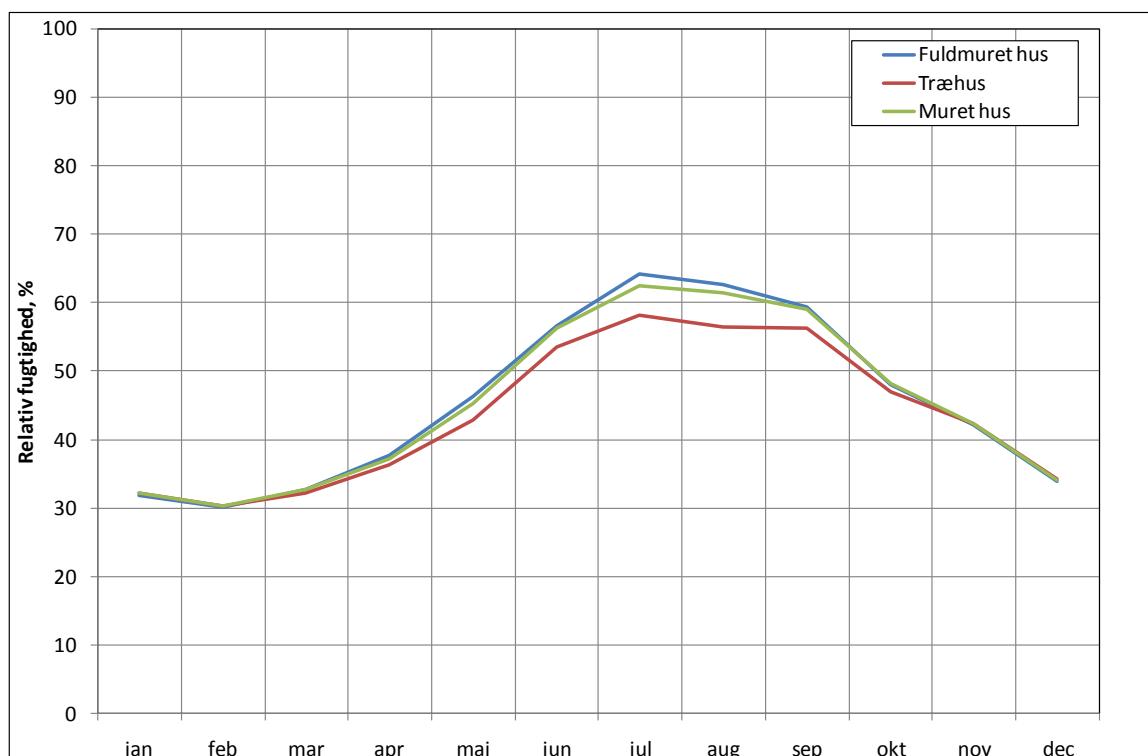
Figur 26 Timeværdier for den indendørs relative fugtighed gennem hele året.



Figur 27 Indendørs relativ fugtighed i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



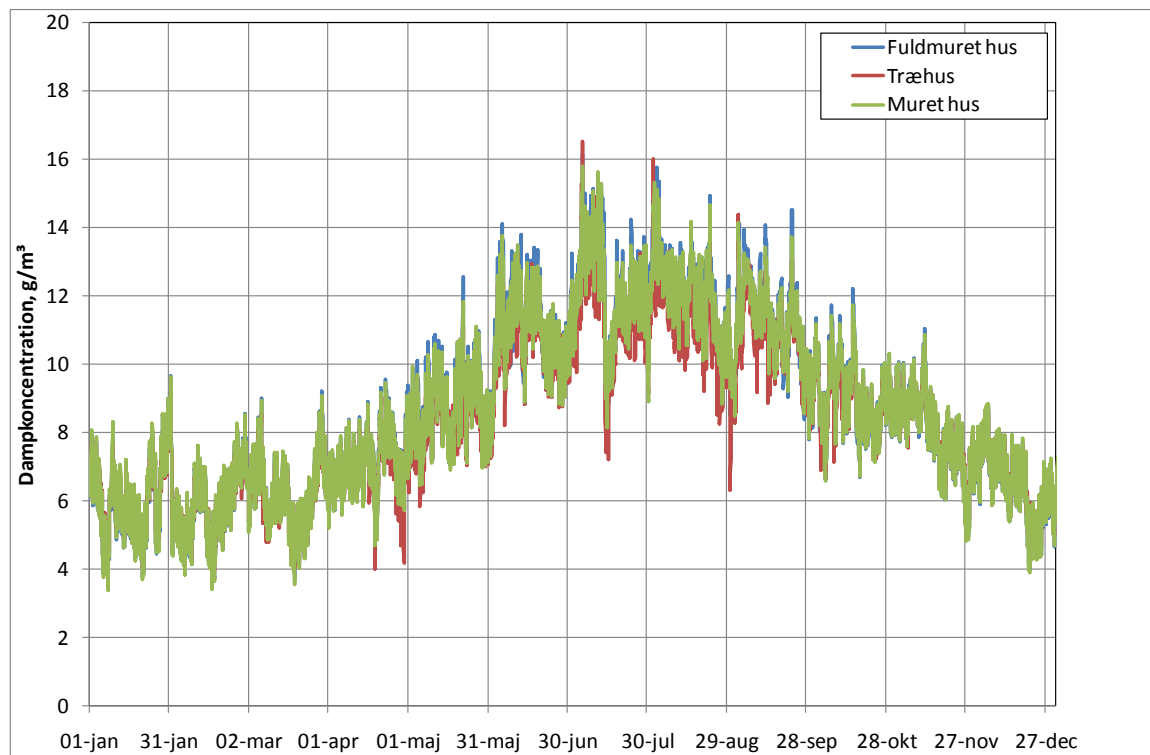
Figur 28 Indendørs relativ fugtighed i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



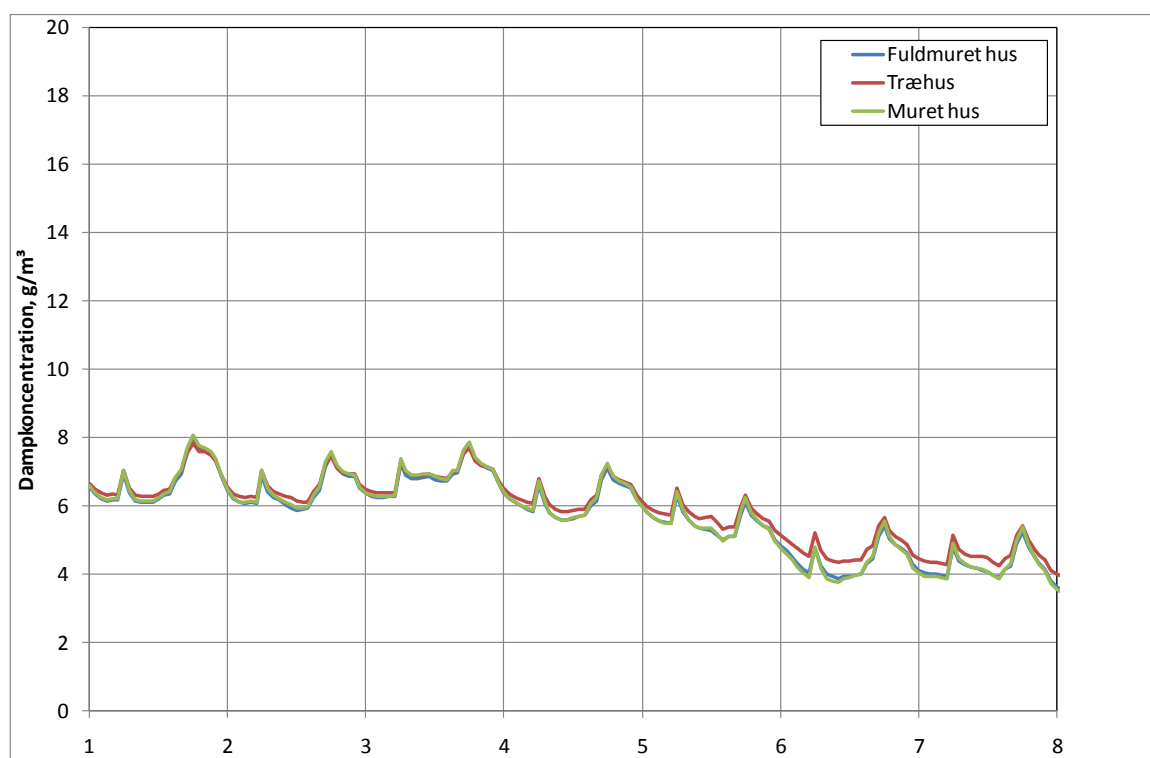
Figur 29 Månedsmidler af den indendørs relative fugtighed i løbet af året.

I perioder, hvor temperaturerne er ens, forløber den indendørs relative fugtighed også på samme måde i de forskellige huse.

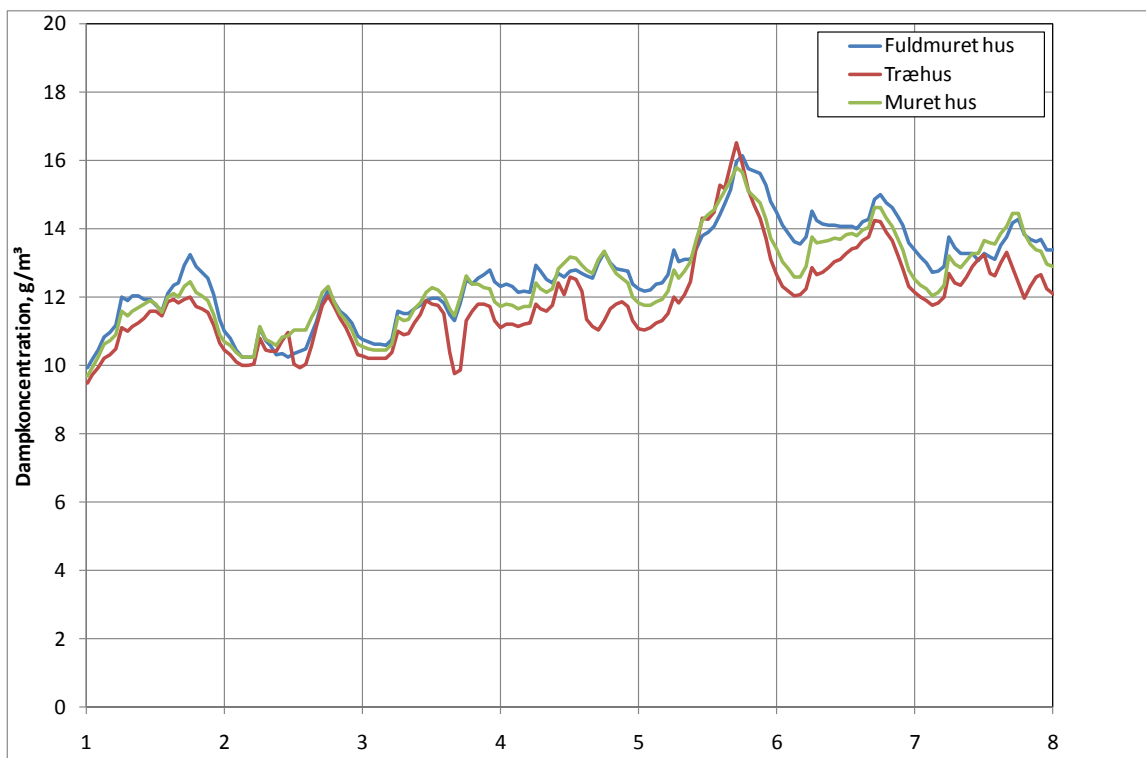
Dampkoncentrationsforløb



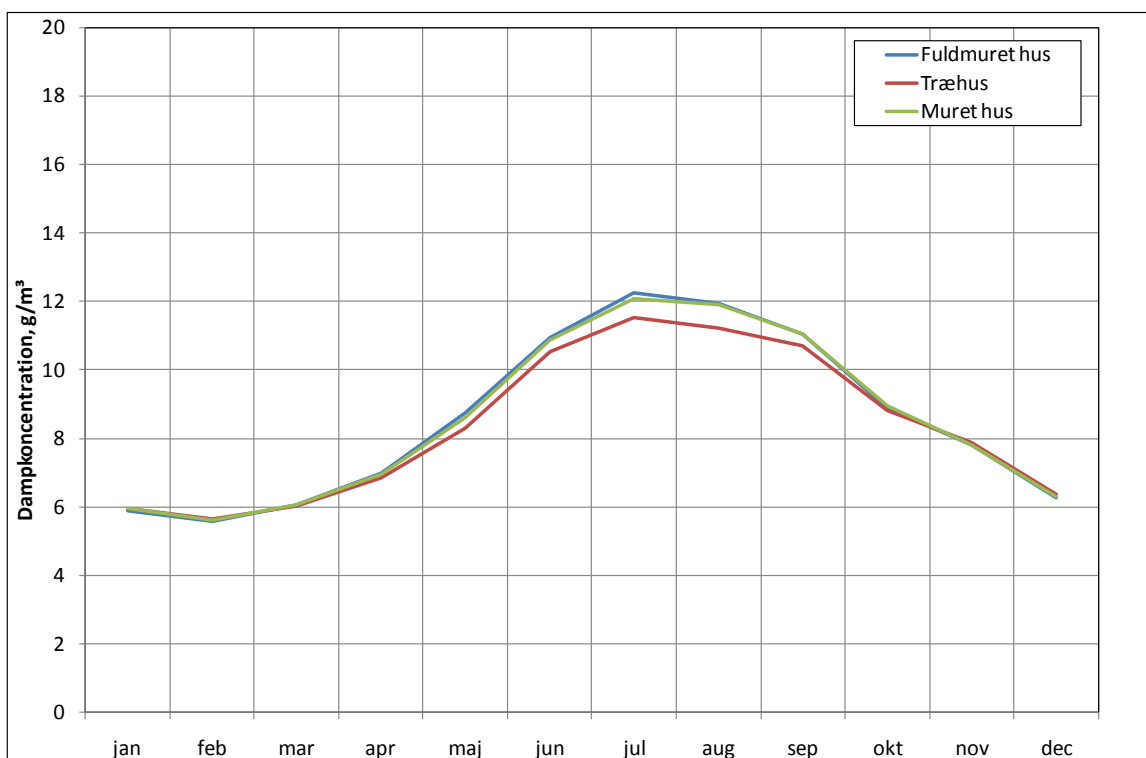
Figur 30 Timeværdier for den indendørs vanddampkoncentration gennem hele året.



Figur 31 Indendørs vanddampkoncentration i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 32 Indendørs vanddampkoncentration i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 33 Månedsmidler af den indendørs vanddampkoncentration i løbet af året.

Den indendørs dampkoncentration forløber stort set ens i alle varianter af huset, idet koncentrationen dog er lavest om sommeren i træhuset. I træhuset er der betydeligt større udluftning (på grund af temperaturer over 24°C) end i det murede hus, som igen har mere udluftning end det fuldmurede hus.

3.3 Helårssimuleringer uden overfladebehandling

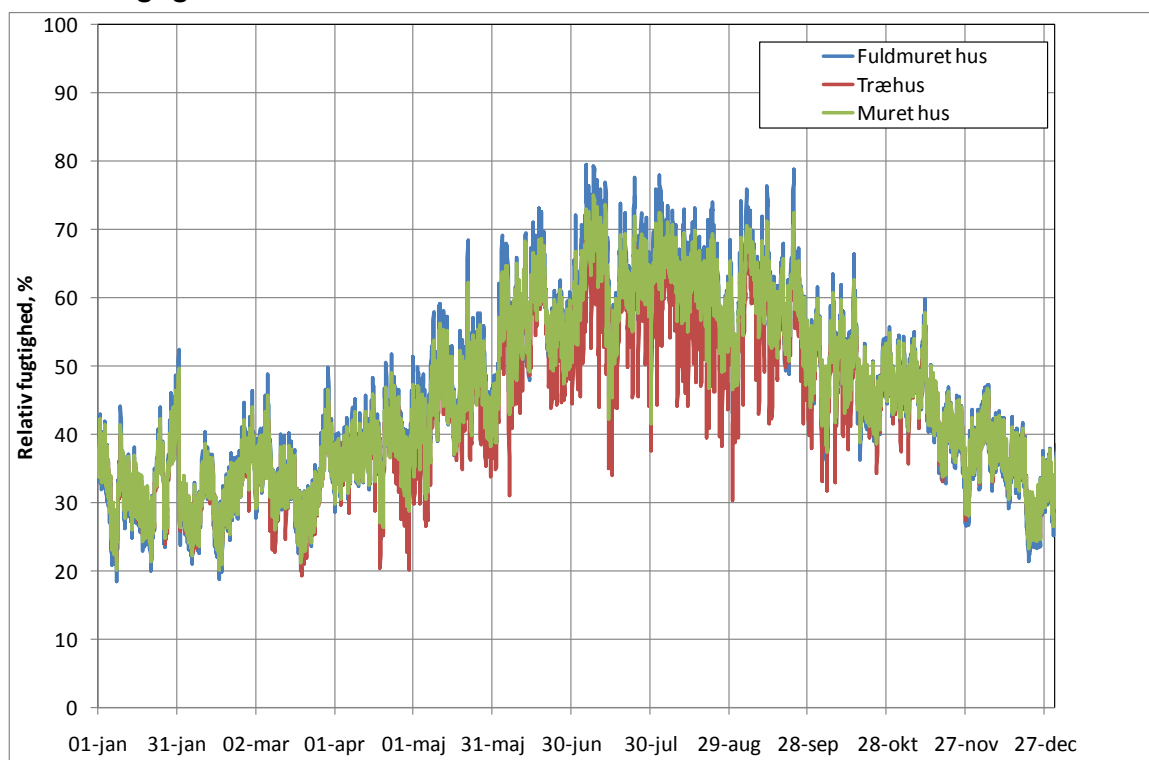
Der er gennemført helårssimuleringer af alle tre huse ved benyttelse af normale danske referenceårs vejrdata (Design Reference Year, DRY).

- Der regnes med temperatursetpunkt på 21°C.
- Der regnes med et luftskifte på 0,5h⁻¹.
- Der regnes med udluftning på 3 h⁻¹ ved temperaturer over 24°C.

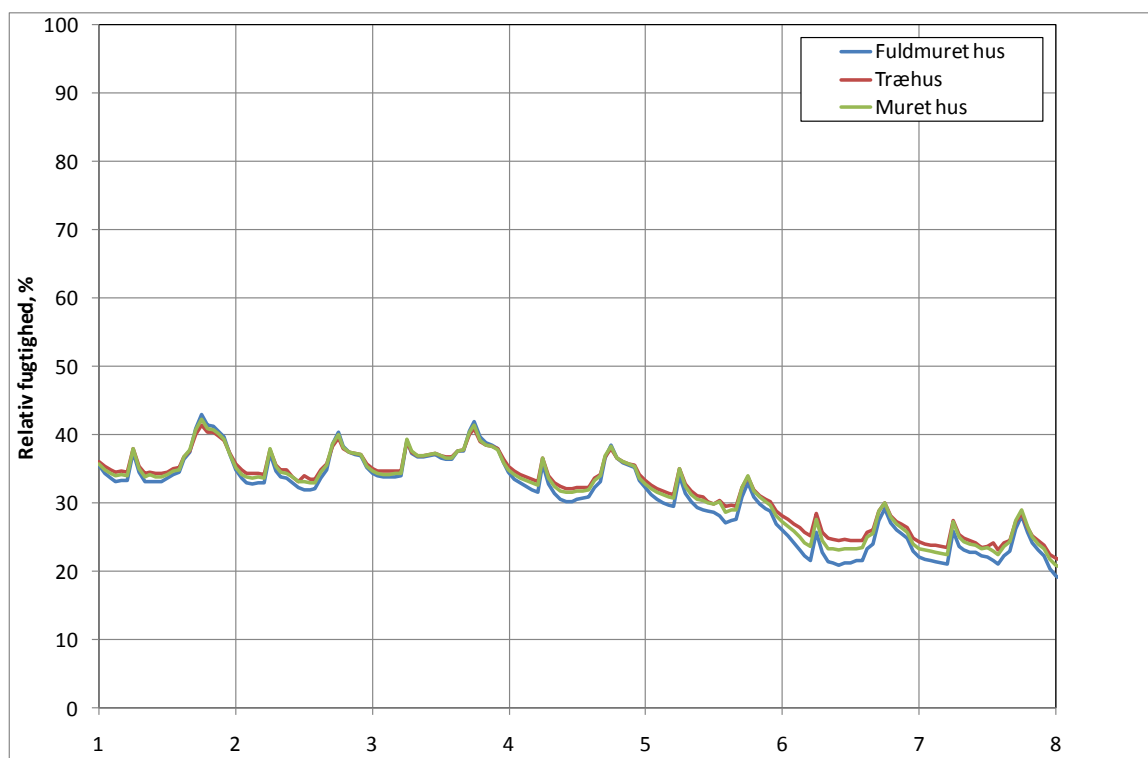
Her benyttes geometrien fra det fuldmurede hus, idet væg-, gulv og loftkonstruktioner fra de øvrige huse på skift er indsat, denne gang dog uden overfladebehandling. Beregningerne for det fuldmurede hus er de samme som beregningerne i de forrige afsnit, idet dette hus altid er uden overfladebehandling.

Temperaturforløbene vises ikke igen, da de stort set er sammenfaldende med temperaturerne fra den forrige gruppe beregninger.

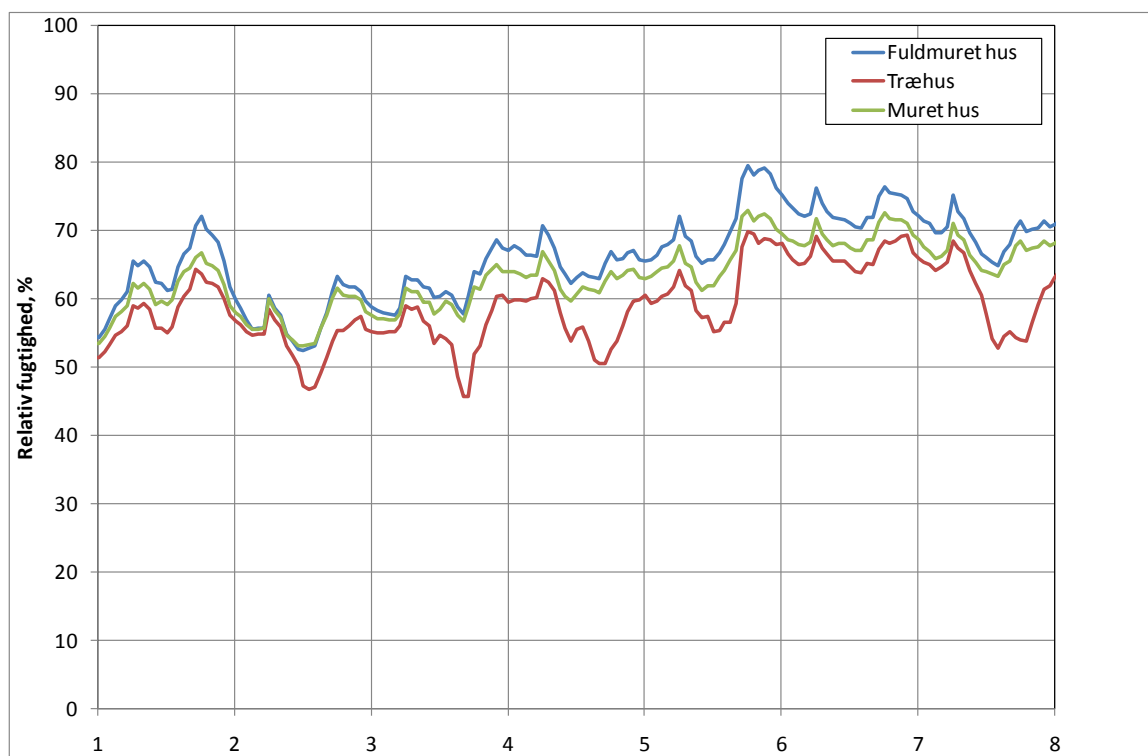
Relativ fugtigheds-forløb



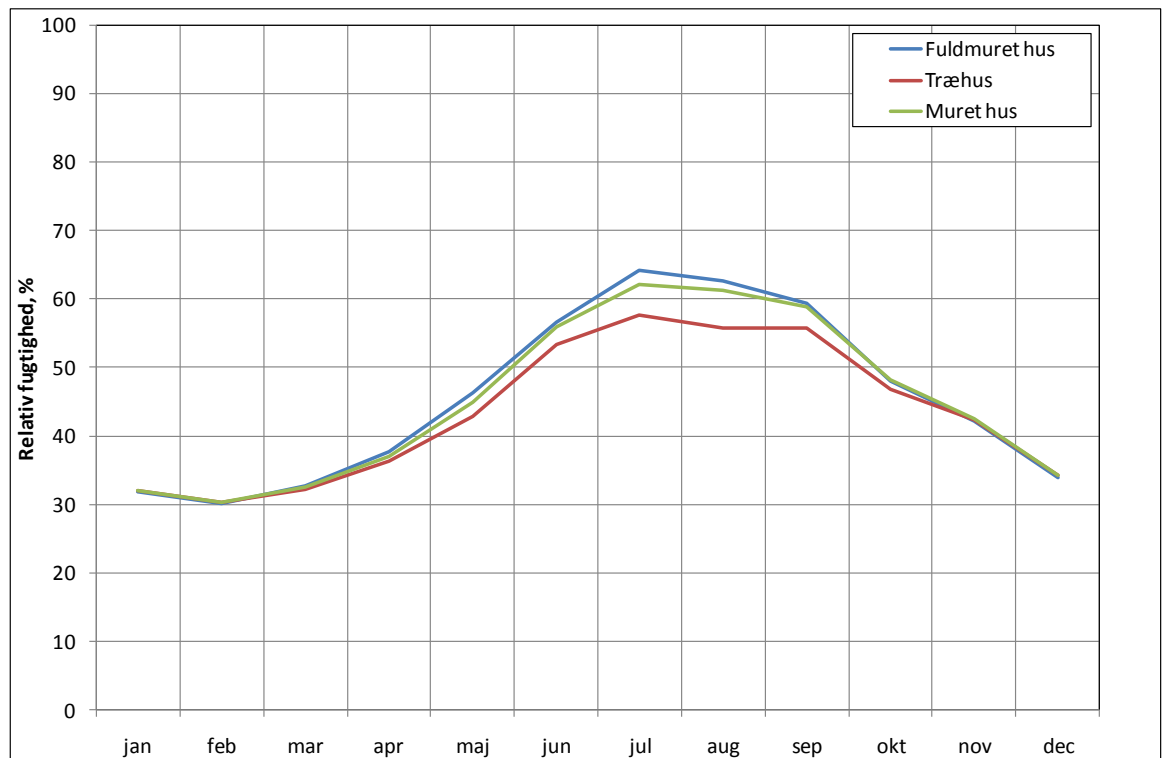
Figur 34 Timeværdier for den indendørs relative fugtighed gennem hele året.



Figur 35 Indendørs relativ fugtighed i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



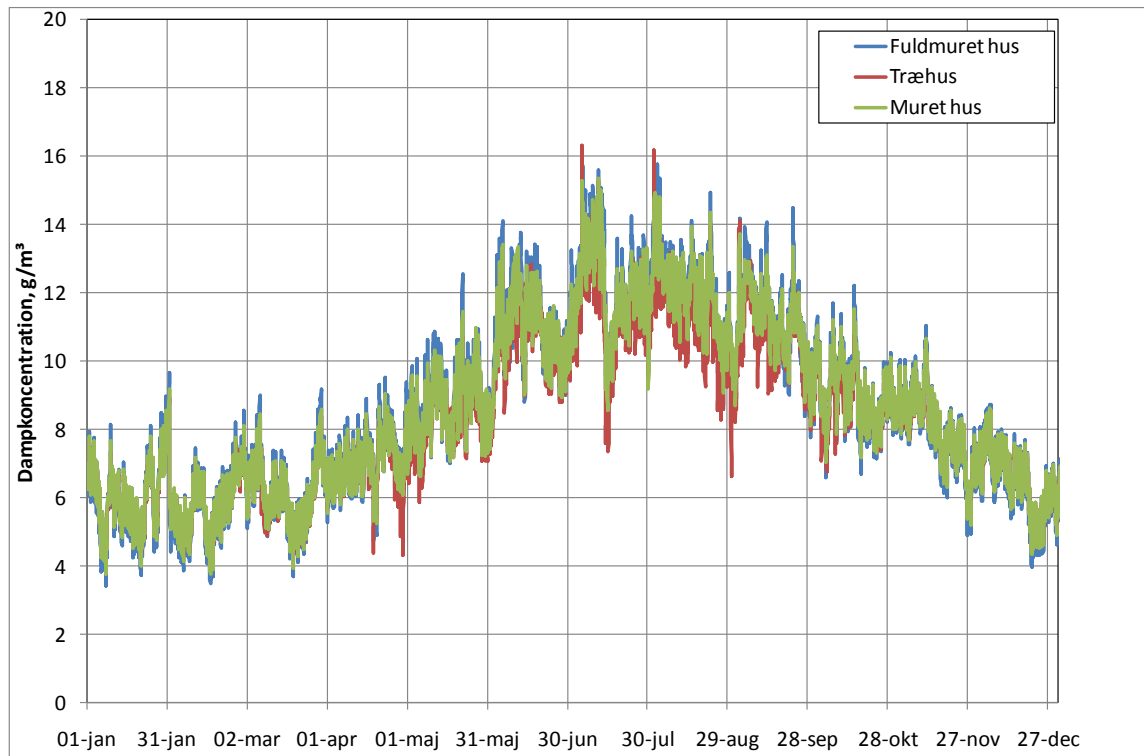
Figur 36 Indendørs relativ fugtighed i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



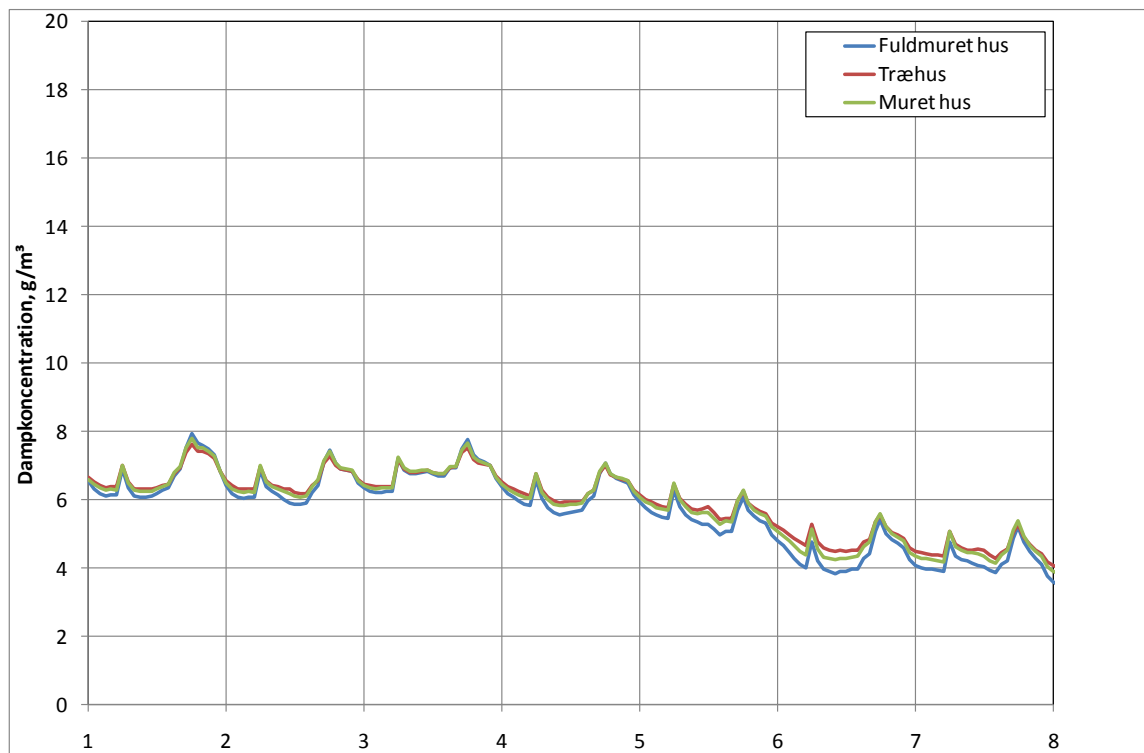
Figur 37 Månedsmidler af den indendørs relative fugtighed i løbet af året.

RF-forløbene er ikke markant anderledes end for beregningerne af de tilsvarende bygninger i tilfælde hvor mange af konstruktionerne havde overfladebehandling. Igen tyder det altså på, at det i højere grad er forskelle i temperaturvariationer i husene, der spiller en rolle for hvilke RF-variationer, man ser, end det direkte er materialernes fugtegenskaber, der spiller en rolle.

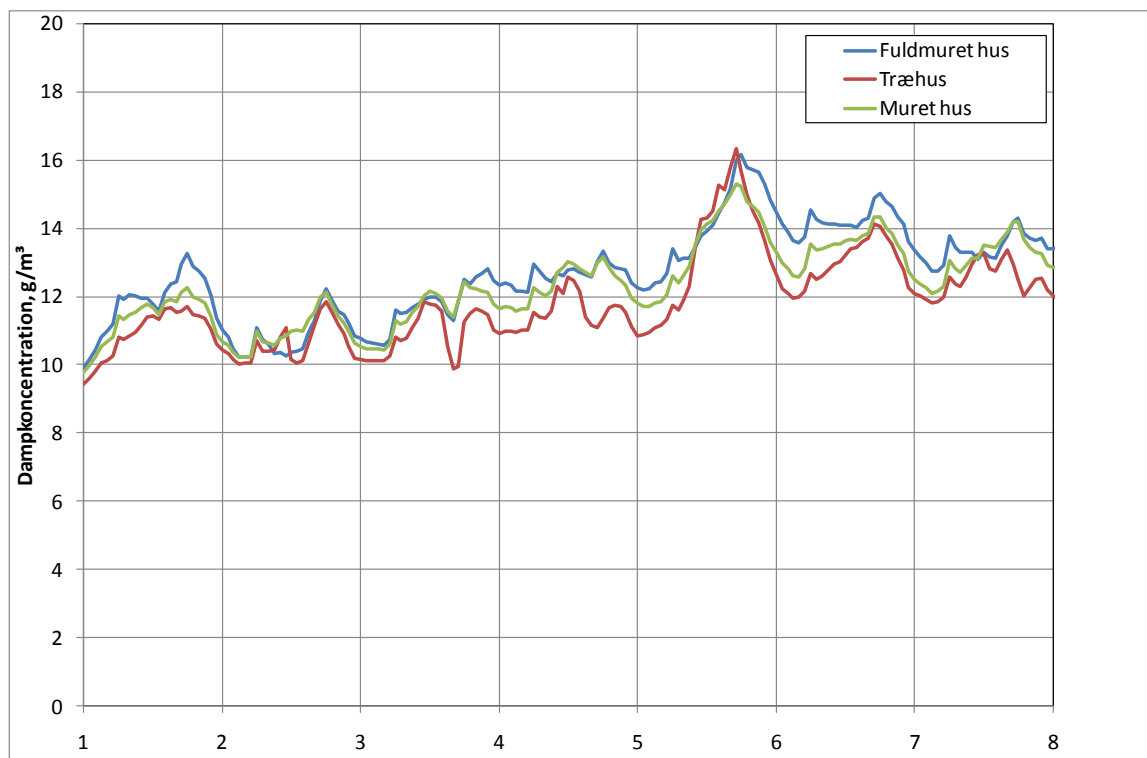
Dampkoncentrationsforløb



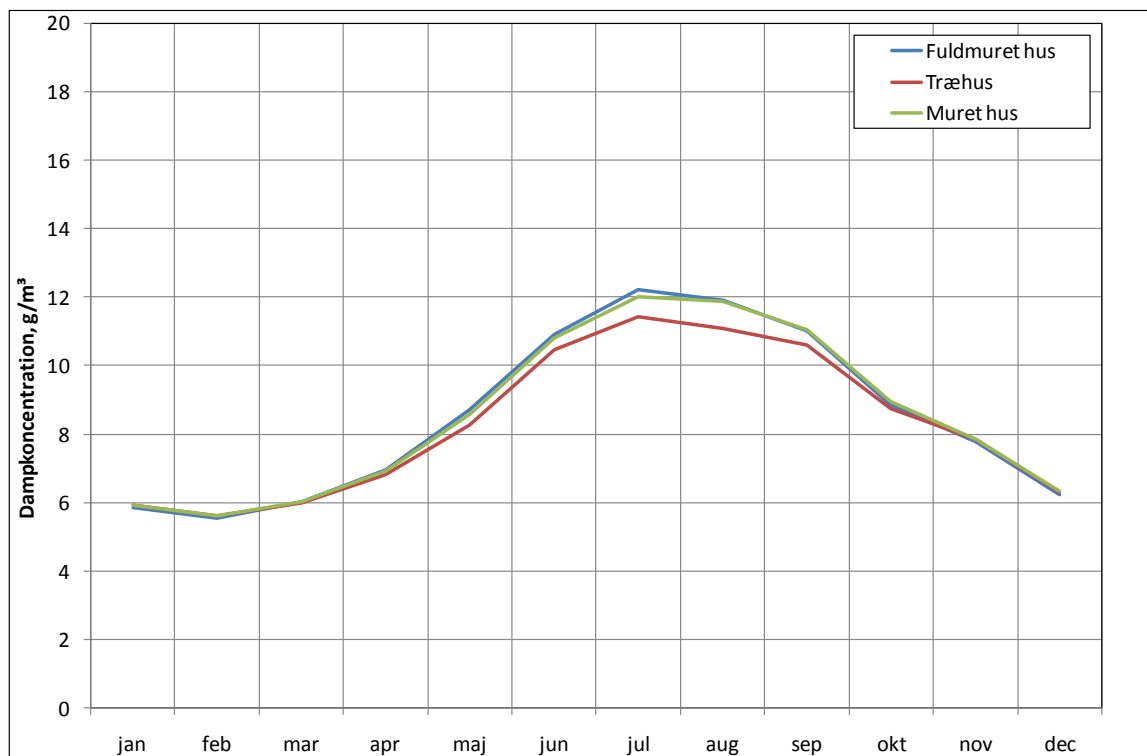
Figur 38 Timeværdier for den indendørs vanddampkoncentration gennem hele året.



Figur 39 Indendørs vanddampkoncentration i Uge 1 (primus januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 40 Indendørs vanddampkoncentration i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



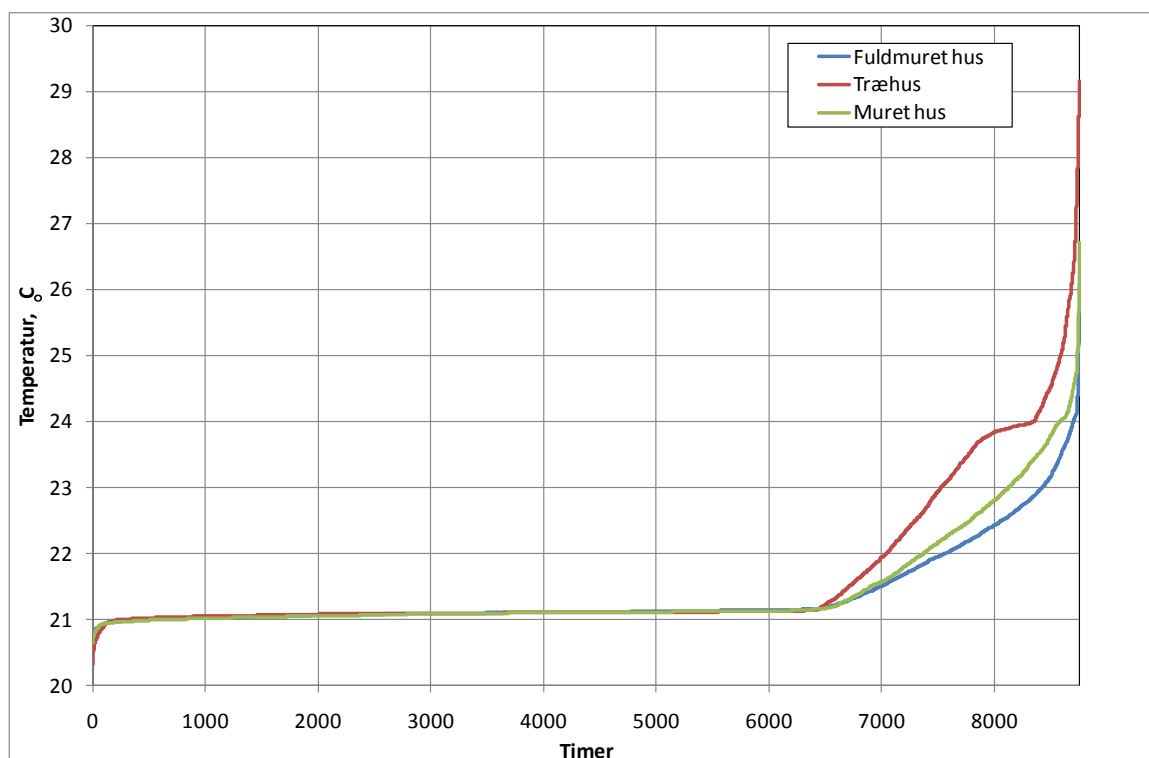
Figur 41 Månedsmidler af den indendørs vanddampkoncentration i løbet af året.

Sammenligningen af vanddampkoncentrationer giver ikke anledning til nye bemærkninger. Forløbene er ret ens, og forskelle, der optræder, er nok især betinget af forskellige niveauer af udluftning i husene, hvilket er en følge af husenes forskelle i temperaturvariationer.

4 Afrunding

Simuleringerne viser, at forskellene i fugtegenskaber for de valgte materialer ikke har en særlig markant indflydelse på det fugtmæssige indeklima i husene set over en længere periode. Der kan dog påvises en betydning af materialer i forbindelse med afdampningen af vand.

Der er derimod store forskelle i materialernes evne til at moderere indendørs temperaturudsving som følge af solindfald og høje udendørstemperaturer. Det fuldmurede hus har et mere temperaturstabil indeklima end træhuset, mens det murede hus med kombinationsmur placerer sig imellem de to. Dette fremgår også af varighedskurven for den indendørs temperatur, Figur 42. Temperaturstabiliteten kan være en kvalitet i sig selv.



Figur 42 Varighedskurver for indendørs temperaturer i Rødvig-huset med forskellige konstruktionsvalg.

Denne egenskab til at regulere de termiske forhold har en indflydelse på (1) behovet for udluftning for at holde overtemperaturer nede, samt (2) hvilken relativ fugtighed, der opnås indendørs. Dette indikerer, at det er disse to forhold, der er mest afgørende for, hvordan byggematerialerne påvirker de fugtmæssige indeklimaparametre.

I rapporten er vurderet forskellige vægkonstruktioners evne til at udjævne indeluftens fugtighed i forbindelse med pludselige ændringer af de indre fugtkilders styrke. Dataindsamlingen har omfattet feltforsøg i tre eksisterende boliger, henholdsvis et fuldmuret hus med indfarvet kalkpuds som eneste indvendige overfladebehandling, et træhus med akrylmaledede gipsplader indvendigt samt et muret hus med akrylmalet letbeton indvendigt. Indsamlede data er sammenlignet med en simpel model for fugt i indeluft. Parallelt hermed er der udført simuleringer i BSim med henblik på at gengive fugtoptag under og efter målingerne, simuleringer af referencesituationer for måleperioderne samt helårssimuleringer. Beregningerne har indbefattet bygningernes termiske indeklimate.

1. udgave, 2009
ISBN 978-87-563-1355-1